



**Escola de Camins**  
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

# Integració de dades geofísiques procedents de mètodes elèctrics i sísmics: Implementació en l'àrea del Delta de l'Ebre

Treball realitzat per:

**Carla Tapia Sánchez**

Tutor:

**Lluís Gonzaga Pujades Beneit**

Tutors externs:

**Anna Gabàs i Gasa**

**Fabian Bellmunt Traver**

Grau en:

**Enginyeria Geològica**

Barcelona, 20/09/2017

Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica

**TREBALL FINAL DE GRAU**

## **AGRAÏMENTS**

La realització d'aquest treball no s'hagués dut a terme sense l'ajuda del meu director de treball, Lluís Pujades, ni dels meus tutors, Anna Gabàs i Fabian Bellmund, als quals vull agrair tot el suport, la confiança i els ànims que m'han donat.

També m'agradaria agrair a la Dra. Sara Figueres per haver-me donat la oportunitat de treballar en el Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya i, en general, a tot el conjunt de la Unitat de Tècniques Geofísiques per totes les facilitats, motivació i, sobretot, coneixements que m'han donat al llarg d'aquest any.

## RESUM

En els darrers anys, la combinació de diferents mètodes geofísics ha estat molt utilitzada per a la caracterització del subsòl d'una manera no agressiva i oferint informació estructural i sobre la composició del subsòl amb bons resultats. Malgrat els bons resultats que s'obtenen amb la inversió independent de cada mètode, els models finals de cada inversió presenten discrepàncies perquè cada paràmetre físic veu el subsòl d'una manera diferent. Per aquest motiu, es considera interessant fer un treball sobre l'estat actual de la integració conjunta de les dades i desenvolupar-ho.

Per tant, l'objectiu principal d'aquest estudi és crear un flux de treball utilitzant dades reals enregistrades al Delta de l'Ebre (perfil La Granadella), procedents dels mètodes geofísics, elèctric i sísmic, per realitzar un tractament conjunt d'aquestes dades. Aquest procés ha de facilitar la interpretació final creant un model únic que s'ajusti a la informació observada d'ambdós mètodes.

En primer lloc, s'ha profunditzat en els principis de mesura i configuració dels mètodes de tomografia elèctrica i de sísmica de refracció, així com també els factors pels quals estan influenciats.

En segon lloc, s'ha analitzat la metodologia que utilitzen els programaris informàtics *SEISRES* (Nath S. K., et al., 2000) i *SUBROUTINES* (Hamdan A., 2012) per realitzar la inversió conjunta i obtenir un únic model final. A més, s'han hagut d'adaptar els fitxers (formats) de tomografia elèctrica i de sísmica de refracció per poder treballar amb ells. A continuació s'explica breument la metodologia de cada programari:

- *SEISRES* és un programa implementat en codi Visual C++ per a un entorn de Microsoft Windows '95, que respon més a un esquema d'inversió seqüencial que simultània. Aquest programa permet l'estimació de la inversió dels raigs sísmics generant un model inicial de capes i la posterior construcció quasi-2D del model elèctric a partir d'aquest últim.
- *SUBROUTINES* és un programa amb codi Matlab per a Microsoft Windows, on la inversió sí que és simultània utilitzant l'algorisme de gradients creuats per invertir conjuntament la resistivitat elèctrica i les primeres arribades de la tomografia sísmica.

Posteriorment, s'han processat les dades d'elèctrica i de sísmica del perfil de La Granadella de manera que s'han invertit de forma independent i conjunta per poder comparar els resultats i buscar les similituds geomètriques en els models (fronteres entre litologies).

La metodologia aplicada ha estat la següent:

- a) Els resultats obtinguts amb la inversió independent mostren una discrepància entre el model elèctric i el sísmic, ja que el model elèctric ens mostra la presència de dues capes i el model sísmic de tres capes.
- b) Quan invertim seqüencialment amb el programari *SEISRES*, els resultats obtinguts mostren la presència de tres capes ben diferenciades en ambdós models, tant l'elèctric com el sísmic, inclús les fronteres són bastants coincidents entre elles. La primera capa conductiva coincideix amb la capa més superficial de baixa velocitat amb un gruix de 2 metres i seguidament apareix una segona capa resistent amb velocitat superior propera als 1500 m/s amb un gruix variable. La forma d'aquesta frontera és similar en els dos models. Finalment, es detecta una capa conductiva més profunda que semblaria que s'associa amb una capa de velocitat elevada (3000 m/s). Malgrat la bona correlació d'aquesta frontera en ambdós models, la interpretació d'aquesta darrera capa és complexa ja que pels valors de velocitat podrien associar-se a un material com la grava, mentre que el resultat del comportament elèctric seria incoherent, ja que la grava hauria d'aportar un valor més resistiu, tal com ho indica la inversió individual de l'elèctrica.
- c) Quan s'inverteixen les dades conjuntament amb el programari *SUBROUTINES*, els resultats obtinguts mostren també la presència de tres capes on les fronteres entre les diferents capes que detecta la tomografia elèctrica són iguals que les fronteres que detecta la sísmica de refracció fins a la fondària de 20 m. Es detecta una primera capa de 2 metres de gruix, una segona capa entre els 2 metres i els 12 metres i, finalment, una tercera capa que arriba fins a la màxima fondària del model. Per tant, s'obté un model geofísic únic que permet una millor interpretació geològica final del subsòl.

Finalment, s'han analitzat els avantatges i els inconvenients de cada programari. S'ha observat que *SEISRES* és un programari aparatós i que requereix molt de temps per a preparar els fitxers abans de realitzar la inversió seqüencial. No obstant, quan estan tots els arxius preparats el temps computacional posterior és molt reduït i la inversió seqüencial s'obté de manera molt ràpida. Pel que fa al programari *SUBROUTINES*, l'entrada de dades és molt senzilla però requereix d'un coneixement apropiat dels paràmetres que intervenen en el procés de la inversió conjunta i el temps que utilitza per a fer la inversió conjunta és extremadament gran.

Del desenvolupament del treball es pot concloure que encara falta molt de treball i molta informació per poder millorar la inversió conjunta avui dia. Els esforços que cal posar en aquesta línia crec que valen la pena, ja que ajudarien a resoldre incerteses que apareixen moltes vegades en els models geofísics i que es tradueixen en no poder donar una resposta clara sobre la seva interpretació.

<b>1. INTRODUCCIÓ</b>	2
<b>2. OBJECTIUS</b>	4
<b>3. MÈTODES GEOFÍSICS</b>	5
3.1. MÈTODE ELÈCTRIC	5
3.1.1. TOMOGRAFIA ELÈCTRICA	7
3.2. MÈTODE SÍSMIC DE REFRACCIÓ	11
3.2.1. TOMOGRAFIA SÍSMICA DE REFRACCIÓ	15
<b>4. METODOLOGIA</b>	17
4.1. PROGRAMARI SEISRES	19
4.2. PROGRAMARI SUBROUTINES HAMDAN ALI	21
<b>5. APLICACIÓ A DADES REALS</b>	23
5.1. ZONA D'ESTUDI	23
5.1.1. SITUACIÓ GEOGRÀFICA	23
5.1.2. ENTORN GEOLÒGIC	24
5.2. DESCRIPCIÓ DEL PROJECTE LIFE EBRO-ADMICLIM	26
5.3. ADQUISICIÓ DE DADES	27
5.3.1. PARÀMETRES D'ADQUISICIÓ	28
5.3.1.1. TOMOGRAFIA ELÈCTRICA	28
5.3.1.2. TOMOGRAFIA SÍSMICA DE REFRACCIÓ	30
5.4. PROCESSAT DE DADES	32
5.4.1. INVERSIÓ INDEPENDENT DE LES DADES ELÈCTRIQUES	33
5.4.2. INVERSIÓ INDEPENDENT DE LES DADES SÍSMIQUES	36
5.4.3. INVERSIÓ CONJUNTA AMB EL PROGRAMARI SEISRES	38
5.4.4. INVERSIÓ CONJUNTA AMB EL PROGRAMARI SUBROUTINES	43
<b>6. ANÀLISI I INTERPRETACIÓ DE RESULTATS</b>	49
6.1. RESULTATS AMB LA INVERSIÓ INDEPENDENT	49
6.2. RESULTATS AMB LA INVERSIÓ CONJUNTA	52
6.2.1. INVERSIÓ CONJUNTA AMB SEISRES	52
6.2.2. INVERSIÓ CONJUNTA AMB SUBROUTINES	58
<b>7. CONCLUSIONS</b>	63
<b>8. REFERÈNCIES</b>	66

## 1. INTRODUCCIÓ

En els darrers anys, els mètodes geofísics han estat molt utilitzats per a la caracterització del subsòl d'una manera no agressiva i oferint informació estructural i sobre la composició del subsòl amb bons resultats. Aquests resultats que s'obtenen són models independents de cadascun dels paràmetres geofísics mesurats (densitat, velocitat sísmica, resistivitat, susceptibilitat magnètica, gamma natural, conductivitat, etc.) Posteriorment, durant la seva interpretació, és quan s'intenten correlacionar els diferents conjunts de dades registrades per tal d'aconseguir un model final únic que s'ajusti al màxim a cadascun dels conjunts de dades de cada mètode.

Malgrat els bons resultats obtinguts treballant en aquesta línia, cal avançar en aquest àmbit de treball per aconseguir un model final que tingui en compte les dades procedents dels diferents mètodes geofísics aplicats abans de la interpretació. Els resultats que s'obtenen amb les inversions independents presenten discrepàncies en els models finals de la inversió perquè cada paràmetre físic veu el subsòl d'una manera diferent. Per aquest motiu, es considera interessant fer un treball previ de recerca bibliogràfica sobre l'estat actual de la integració conjunta de dades geofísiques. En aquest treball s'estudiarà la integració del mètode sísmic i l'elèctric, perquè són les dues tècniques més utilitzades en la geofísica superficial que utilitza l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, institució on he realitzat aquest treball de final de grau. Aquestes dues tècniques: el mètode elèctric de corrent continu o també anomenat tomografia elèctrica i el mètode de sísmica de refracció o també anomenat tomografia sísmica de refracció, són molt utilitzats ja que són mètodes superficials que s'adapten molt bé a les problemàtiques geofísiques que ha de resoldre l'equip de treball on m'he integrat. Un cop es conegui l'estat actual d'aquest procés s'escolliran les millors opcions per implementar una metodologia que posteriorment s'aplicaran a unes dades reals.

Les dades reals que es faran servir s'obtenen de perfils elèctrics i perfils sísmics mesurats en el Delta de l'Ebre, dins d'un projecte de la Unió Europea (LIFE Ebro-Admiclim). S'han agafat aquests perfils ja que l'ambient geològic i la disposició litològica estratificada fan que sigui una zona de treball òptima per l'aplicació dels mètodes elèctrics i sísmics. Aquests perfils coincideixen en la seva localització, de manera que estan investigant la mateixa secció del subsòl i, en alguns casos, també es disposa de sondejos per a la validació de la metodologia. A més a més, el Delta del Ebre és una zona poc poblada i amb poc soroll, tant elèctric com sísmic,

i per tant les dades obtingudes són bones. És per aquest motiu que es consideren ideals per a ser utilitzades en aquest treball.



## 2. OBJECTIUS

L'objectiu d'aquest estudi és crear un flux de treball utilitzant dades procedents dels mètodes geofísics, elèctric i sísmic, per realitzar un tractament conjunt d'aquestes dades. Aquest procés ha de facilitar la interpretació final creant un model únic que s'ajusti a la informació observada d'ambdós mètodes.

Per crear aquest flux de treball s'han dut a terme una sèrie de fases que es descriuen a continuació:

- L'equip de tècniques geofísiques de l'ICGC vol aconseguir una metodologia per invertir dades conjuntes procedents de l'elèctrica i la sísmica, però encara no ha iniciat cap treball en aquesta línia. Aquest estudi pretén ser la primera presa de contacte amb el tractament conjunt de dades. És per aquest motiu que la primera fase requereix fer una recerca bibliogràfica exhaustiva sobre la inversió conjunta de dades elèctriques i sísmiques, recollir i seleccionar la informació disponible. Aquesta recerca bibliogràfica m'ha portat a trobar diferents programaris geofísics per a realitzar aquesta inversió conjunta.
- En la fase dos s'ha realitzat la inversió independent de cadascun dels perfils (elèctric i sísmic) amb els programaris que disposa l'ICGC (*Res2dInv* i *Rayfract*). Per tal de desenvolupar la fase dos del treball es requereix entendre els fonaments teòrics dels dos mètodes geofísics involucrats en el treball: tomografia elèctrica i sísmica de refracció. Per aquest motiu s'ha estudiat el funcionament teòric (fonaments i processat de dades) i pràctic (assistència en la presa de mesures en el camp) de les dues tècniques.
- La tercera fase consisteix en aprendre a utilitzar els diferents programaris seleccionats per a la inversió conjunta fent una verificació del bon funcionament amb dades teòriques i posteriorment, amb dades reals del Delta de l'Ebre.
- L'última fase implicarà una comparació entre les inversions individuals i les conjuntes i, a més a més, un anàlisi de la interpretació dels models finals obtinguts i la seva correlació amb la seva informació geològica de la zona.

### 3. MÈTODES GEOFÍSICS

Els mètodes de prospecció geofísica ens permeten caracteritzar el subsòl, sense pertorbar-lo, i donar-nos informació sobre la seva estructura i composició, definint la distribució espacial de les propietats físiques de les formacions geològiques. En aquest estudi s'han treballat dues tècniques geofísiques molt conegudes; el mètode elèctric i el mètode sísmic.

El mètode elèctric, és molt efectiu per estudiar zones afectades per fluids gràcies a la seva elevada sensibilitat en presència dels ions, siguin zones costeres amb intrusió d'aigua salada, o zones interiors amb diferents nivells freàtics (Ogilvy et al. 2009).

El mètode sísmic presenta una elevada capacitat per a detectar i descriure l'estructura de la formació geològica, posant molt d'èmfasi en la localització de falles i de zones fracturades (Balía et al. 2003).

#### 3.1. MÈTODE ELÈCTRIC

La prospecció elèctrica es basa en la determinació de la variació de potencial elèctric, el qual depèn de la resistivitat elèctrica del medi ( $\rho$ ). Per un model ideal, el qual seria tenir un medi homogeni, aquest paràmetre es calcula a partir de la intensitat del corrent elèctric injectada i de la diferència de potencial mesurada:

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I}$$

La resistivitat elèctrica és una de les magnituds físiques que presenta major rang de variació i solapament a la natura, ja que la resistivitat de les roques i minerals que componen el subsòl depèn, entre altres, de la composició química, de la porositat i l'estructura del material, i de la quantitat i el tipus de fluid que contenen (figura 3.1).

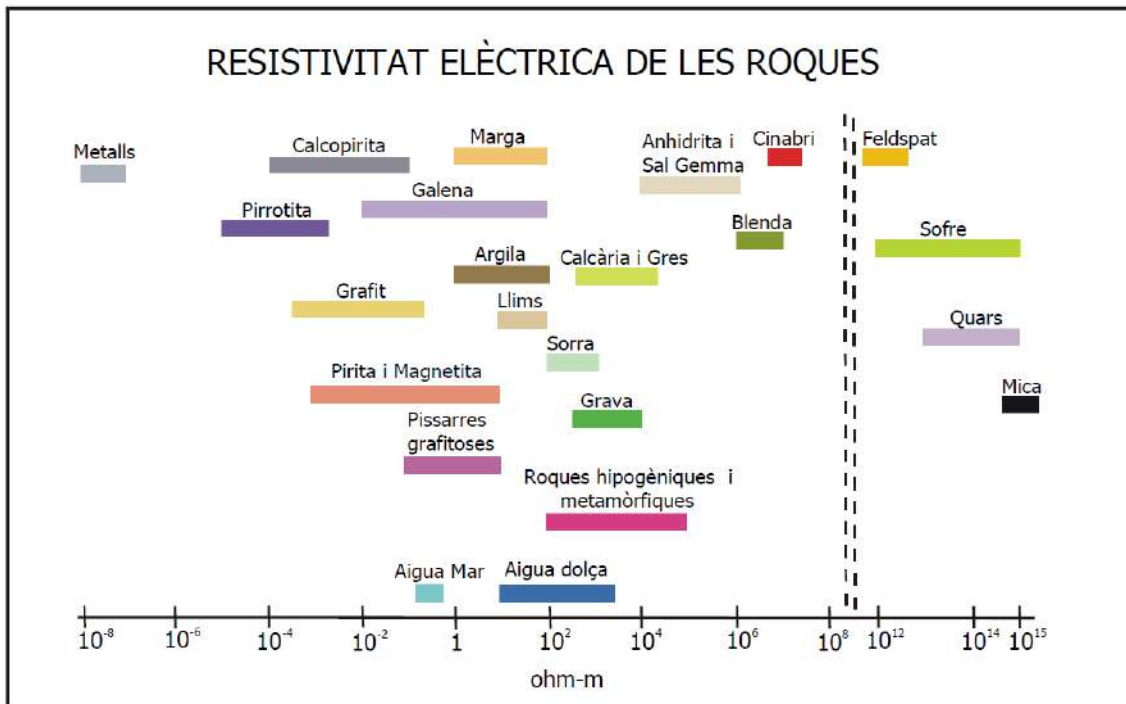


FIG. 3.1. Valors de la resistivitat elèctrica en algunes roques i minerals (modificat d'Orellana, 1982).

En la realitat, quan s'estudia el subsòl, aquest no acostuma a ser un medi homogeni. Per tant, la resistivitat elèctrica no es pot obtenir directament amb mesures realitzades des de la superfície, i per això, s'introdueix el concepte de resistivitat aparent ( $\rho_{ap}$ ).

$$\rho_{ap} = K \frac{\Delta V}{I} = KR$$

On K és un coeficient que depèn de la geometria del dispositiu, es mesura en unitats de longitud, i R és la magnitud de la resistència elèctrica.

Tot i això, quan el dispositiu estigui format per quatre elèctrodes, dos de corrent i dos de potencial, situats de forma alineada (tomografia elèctrica), el coeficient K es calcularà de manera diferent a través de la següent expressió:

$$K = 2\pi \cdot \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1}$$

On les lletres A i B designen els elèctrodes de corrent i, M i N, els elèctrodes de potencial i, per tant, K es determina a partir de les distàncies entre aquests quatre elèctrodes. (Dahlin i Zhou, 2004).

Per tant, el càlcul de la resistivitat aparent es determina a partir de la variació de les distàncies entre els elèctrodes (A, B, M i N) i amb els valors obtinguts es realitza la representació gràfica que s'anomena pseudosecció.

### 3.1.1. TOMOGRAFIA ELÈCTRICA

Actualment, la tècnica de prospecció elèctrica en corrent continu més utilitzada és la tomografia elèctrica (ERT en 2D ó 3D) (Revil, 2012) on el resultat que s'obté és una imatge bidimensional o tridimensional que aporta informació molt rellevant de les variacions laterals i verticals de la resistivitat elèctrica del subsòl.

L'obtenció de les dades en 2D es realitza traslladant quatre elèctrodes al llarg d'una línia recta per sobre de la superfície (Gabàs, 2003) amb increments en la separació entre els parells d'elèctrodes del dispositiu (elèctrodes de corrent i potencials) augmentant així la profunditat d'investigació.

Tot i comptar amb diverses distribucions dels elèctrodes en el perfil (configuracions), en aquest treball s'utilitza la configuració Dipol-Dipol. Cada configuració presenta els seus avantatges i inconvenients, per tant, és important escollir aquella més adient en funció de l'objecte d'estudi, la profunditat de penetració a la qual es pretén arribar i el tipus de resolució necessària (Gabàs, 2003).

La configuració Dipol-Dipol està formada per dos dipols, un dipol d'emissió i un altre de recepció separats una certa distància entre ells. La separació entre els elèctrodes és un valor generalment constant anomenat ' $a$ ' tant en el parell d'emissió com en el de recepció. Mentre que la distància que hi ha entre els dos dipols varia a cada mesura, i és un múltiple de la separació entre els elèctrodes, ' $na$ ' (figura 3.2).



FIG. 3.2. Dispositiu Dipol-Dipol

A mesura que augmenta aquesta distància entre dipols també ho fa la profunditat de penetració del senyal, segons indica la taula 3.1.

Tipus de configuració	$n$	$Z_e/a$	$Z_e/L$
Dipol-Dipol	1	0.416	0.139
	2	0.697	0.174
	3	0.962	0.192
	4	1.220	0.203
	5	1.476	0.211
	6	1.730	0.216

TAULA 3.1. Determinació de la profunditat d'investigació,  $Z_e$ , en funció de  $L$ ,  $a$  i  $n$ , pel dispositiu electròdic Dipol-Dipol (Ike, 1999).

Un problema d'aquesta configuració és la pèrdua del senyal quan la distància entre els dipols és massa gran. Existeixen, però, estratègies per solucionar aquest inconvenient que consisteixen en augmentar la separació entre els elèctrodes ' $a$ '.

Un esquema de la implementació d'una tomografia elèctrica amb l'equip de mesura es visualitza en la figura 3.3, format per un cable multicanal amb un nombre determinat d'elèctrodes equi-espaiats sobre el perfil, aquests elèctrodes poden ser tant de corrent com de potencial, i una font d'alimentació. El cable multicanal es troba connectat a un instrument que controla la seqüència de prendre les dades (figura 3.5). L'aparell de tomografia elèctrica permet seleccionar la configuració dels elèctrodes que serviran per introduir el corrent elèctric i els elèctrodes que serviran per mesurar la diferència de potencial elèctric (Gabàs, 2003).

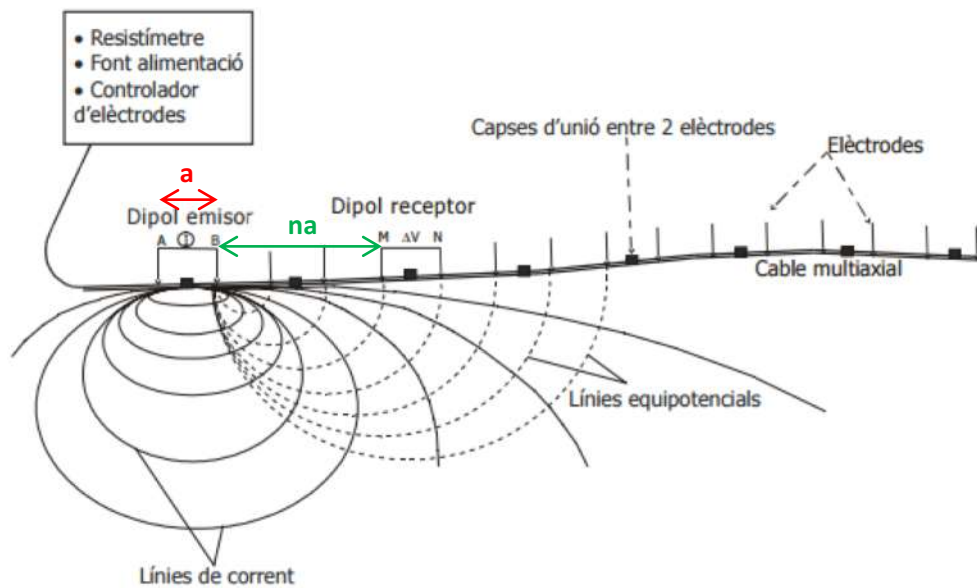


FIG 3.3. Diagrama d'un dispositiu de tomografia elèctrica pel cas de la configuració Dipol-Dipol, i la corresponent distribució de les línies de corrent i de potencial en el subsòl. (Gabàs, 2003).

La imatge elèctrica bidimensional del subsòl es pot crear a partir de la resistivitat aparent del terreny que es calcula a partir de la diferència de potencial i la intensitat elèctrica. Aquesta imatge bidimensional és la ja esmentada pseudosecció i no s'ha de considerar en cap cas, l'estructura elèctrica real del subsòl. Un exemple de la construcció d'aquesta imatge elèctrica es mostra en la figura 3.4, per un dispositiu Dipol-Dipol de 15 elèctrodes.

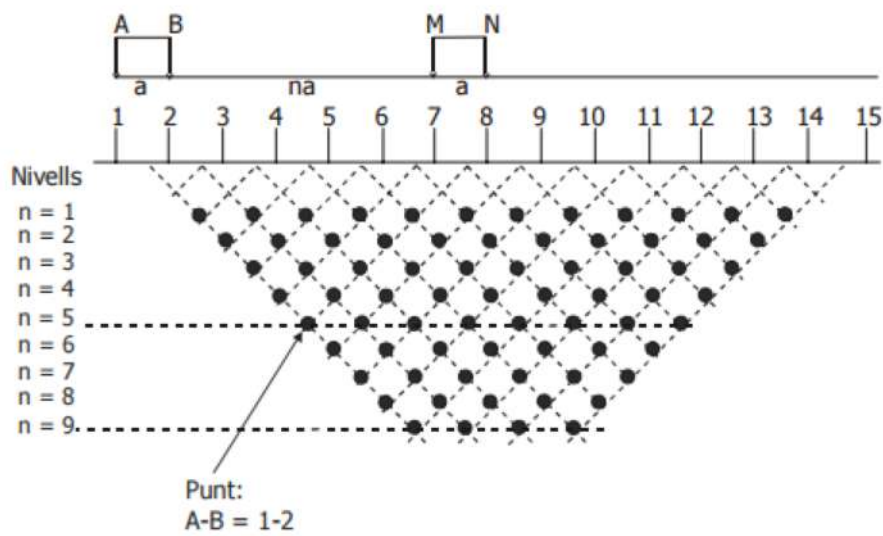


FIG. 3.4. Mostra de la construcció d'una pseudosecció per a un dispositiu Dipol-Dipol de 15 elèctrodes. Extret de Gabàs, 2003.

Cada fila de dades de la pseudosecció està mesurada amb la mateixa distància entre els dipols; els elèctrodes que injecten corrent al medi, A i B, i els elèctrodes que mesuren la diferència de potencial elèctric, M i N. La dada mesurada, que és la posició horitzontal, se situa en el punt mig entre els quatre elèctrodes que formen la configuració electròdica. El nivell de profunditat, que és la posició vertical de la mesura, està directament relacionat amb la distància que separa els elèctrodes de corrent i de potencial. Una separació gran entre ells fa possible que les línies de corrent arribin a més profunditat i per tant, donen informació de zones més profundes subsòl.

Quan s'estudia la pseudosecció, es pot veure que aquesta imatge no determina correctament el contrast de la resistivitat elèctrica de les estructures i per tant, a l'hora d'interpretar els resultats sempre és convenient recórrer al procés d'inversió dels observables. El procés de la inversió consisteix en obtenir un possible model del subsòl el qual tingui com a resposta un valor ajustat a les dades mesurades en superfície. Per a fer això, cal que s'introdueixin com a dades d'entrada tota la informació de la qual es disposa (geometria del dispositiu, resistència o resistivitat aparent, model inicial, error de les dades observades i si és el cas la topografia de la superfície on s'han fet les mesures).

El procés d'obtenció d'un model del subsòl mitjançant la inversió es resumeix a la figura 3.6. Aquest model s'obté a partir de les dades mesurades en superfície, que són representades en forma de pseudosecció (dades mesurades), i d'un model inicial homogeni de resistivitats del subsòl que donen una resposta (dades calculades) mitjançant la resolució del 'problema directe'. Aquesta resposta es compara amb les dades mesurades i es determina l'error a partir de la diferència entre elles (RMS). Tenint en compte el valor d'aquest error, si és molt gran es modifica el model inicial de resistivitats del subsòl, i es repeteix el procés anterior. Així, normalment després d'un nombre considerable d'iteracions, s'aconsegueix un model de resistivitats del subsòl que s'ajusta a les resistivitats aparents mesurades.



FIG. 3.5. Resistímetre SYSCAL encarregat d'executar la seqüència de mesures.

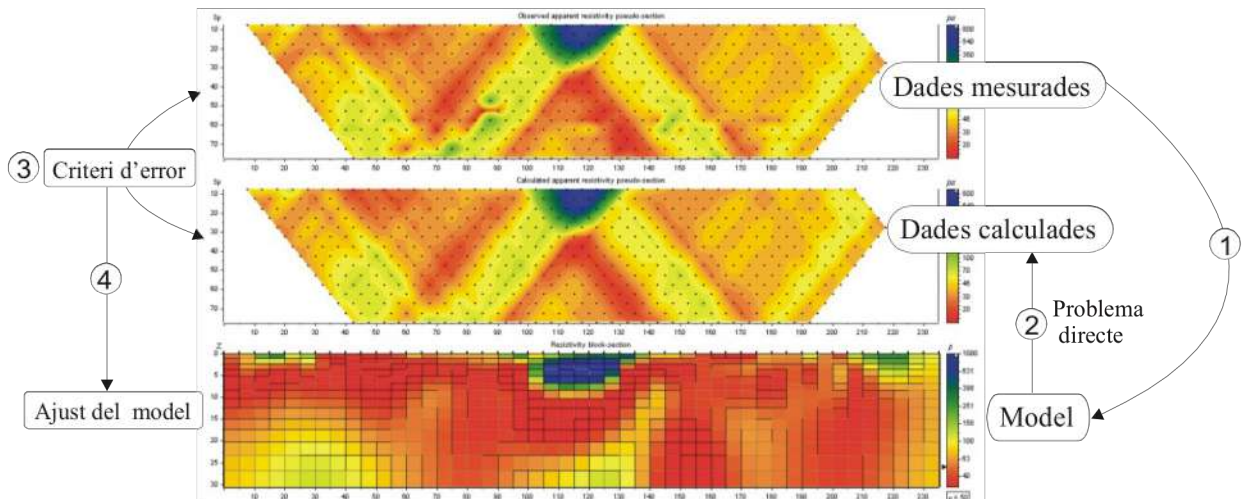


FIG. 3.6. Esquema del procés d'inversió en tomografia elèctrica (basat en Marescot, 2003).

### 3.2. MÈTODE SÍSMIC DE REFRACCIÓ

La prospecció sísmica és aplicada habitualment en àrees on hi ha poca informació geològica de superfície i es basa en l'estudi de la propagació d'ones elàstiques que es produeixen artificialment sobre el terreny amb un explosiu o amb la caiguda d'un pes (font).

Les ones sísmiques es poden distingir en dos grups, per una banda, les ones internes P i S, i per l'altre banda les ones superficials, entre les quals destaquen les ones Rayleigh i Love (Griem i Griem, 1999):

- *Ones P*: Són ones de compressió, que produeixen que les partícules es moguin endavant i endarrere en la mateixa direcció de propagació de l'ona. Són les ones que viatgen a més velocitat, i per tant s'enregistren primer, per aquest motiu són anomenades també ones primàries. Per altra banda, es particularitzen per ser les úniques que es propaguen en els líquids (Atkin i Fox, 1980).
- *Ones S*: Són ones de cisalla, on les partícules es mouen endavant i endarrere perpendicularment a la direcció de propagació de l'ona (Atkin i Fox, 1980). Arriben després de les ones P, ja que viatgen a menys velocitat i per tant reben el nom d'ones secundàries.



- *Ones Rayleigh*: Són ones superficials que es caracteritzen per produir un moviment en forma el·lipsoïdal en el pla vertical, que passa per la direcció de propagació de l'ona. (Richter, 1958).
- *Ones Love*: Són ones superficials que produeixen un moviment horitzontal de cisalla en superfície.

Els fonaments teòrics en què es basa la sísmica de refracció són els que regeixen la propagació i la trajectòria de les ones sísmiques i ens serveixen per entendre el comportament de les ones dins del medi:

- *Principi de Huygens*: Es basa en una construcció geomètrica simple, que permet calcular, a partir d'una posició determinada, com evolucionarà el front d'ona, és a dir, cada punt d'un front d'ones primàries dóna lloc a un nou front d'ones secundàries, els quals es poden propagar en totes direccions (figura 3.7).

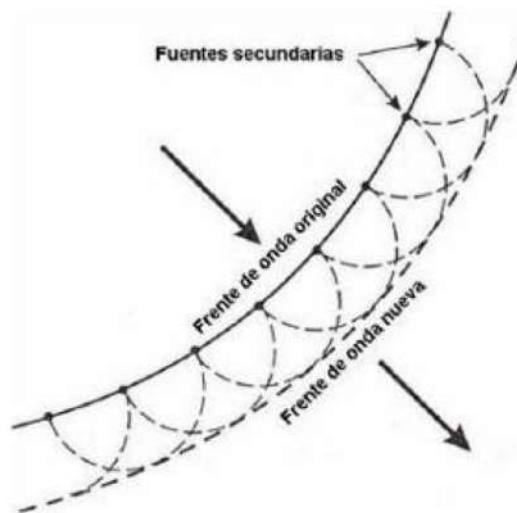


FIG. 3.7. Propagació d'un front d'ona segons el principi de Huygens.

- *Principi de Fermat*: Estableix que, un raig que viatja d'un punt a un altre, segueix una trajectòria tal que, la velocitat que necessita per fer el recorregut és mínima. (Peralta, 2007).

- *Llei de Snell*: Estableix, que la relació entre el sinus de l'angle incident ( $\theta_1$ ) i el refractat ( $\theta_2$ ) és la mateixa que l'existent entre la velocitat del medi inicial ( $v_1$ ) i la del medi més profund ( $v_2$ ) (figura 3.8).

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (\text{Llei de refracció})$$

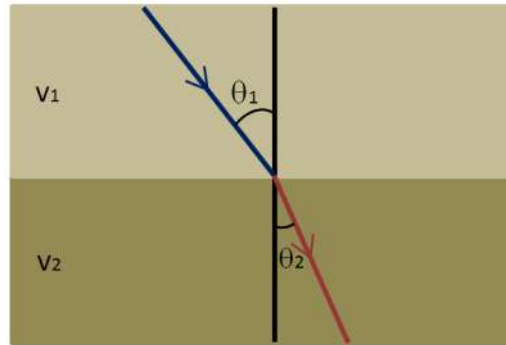


FIG. 3.8. Esquema de la Llei de Snell.

En particular, el mètode sísmic de refracció consisteix en mesurar els temps d'arribada de les ones elàstiques en funció de la distància a la font sísmica. D'aquesta manera, s'obté informació sobre la velocitat dels materials del subsòl. Les ones sísmiques tenen la propietat de viatjar a velocitats diferents segons les propietats elàstiques dels materials que el travessen. Aquestes propietats estan relacionades tant amb la litologia, la fondària i/o l'estat mecànic del material com la fracturació, el grau de compactació o la saturació. En el cas de les ones P, la velocitat varia segons el fluid present en els porus de les roques. Així, un exemple de la relació que es pot esperar entre la litologia i la velocitat sísmica es presenta en la taula 3.2.

Tipus de material		Velocitats (m/s)
<i>No consolidats</i>	Sorra (no saturada)	200-1000
	Sorra (saturada)	1500-2000
	Argila	1000-1750
	Graves	1500-2500
<i>Roques sedimentàries</i>	Gres	2000-4500
	Calcàries	3000-5500
	Margues	2500-3000
	Sal	4500-5000
	Guix	2000-3000
<i>Fluids dels porus</i>	Aire	300
	Aigua	1400-1500
	Gel	3400

TAULA 3.2. Rangs de velocitats de les ones sísmiques en funció del tipus de materials.

Per generar l'energia sísmica s'impacta de manera controlada en la superfície amb una font. Aquest impacte es propaga en forma d'ona elàstica a través del subsòl interaccionant amb les diferents capes, de manera que una part de l'energia es reflecteix i roman en la mateixa capa que l'energia incident, i la resta es transmet a la següent capa amb un pronunciat canvi de la direcció de propagació a causa de l'efecte de la interfase (refracció). D'aquesta interacció, la sísmica de refracció només considera les refraccions amb angle crític ja que són les úniques ones refractades que arriben a la superfície i poden ser enregistrades pels geòfons (Dobrin i Savit, 1988) (figura 3.9).

Per realitzar aquesta tècnica és necessari utilitzar una font artificial que emeti un senyal de sortida, que en el nostre cas és el mall i una sèrie de sensors anomenats geòfons, distribuïts sobre la superfície a diferents distàncies que transfereixin el senyal elèctric a través d'un cable sísmic a l'enregistrador o sismògraf.

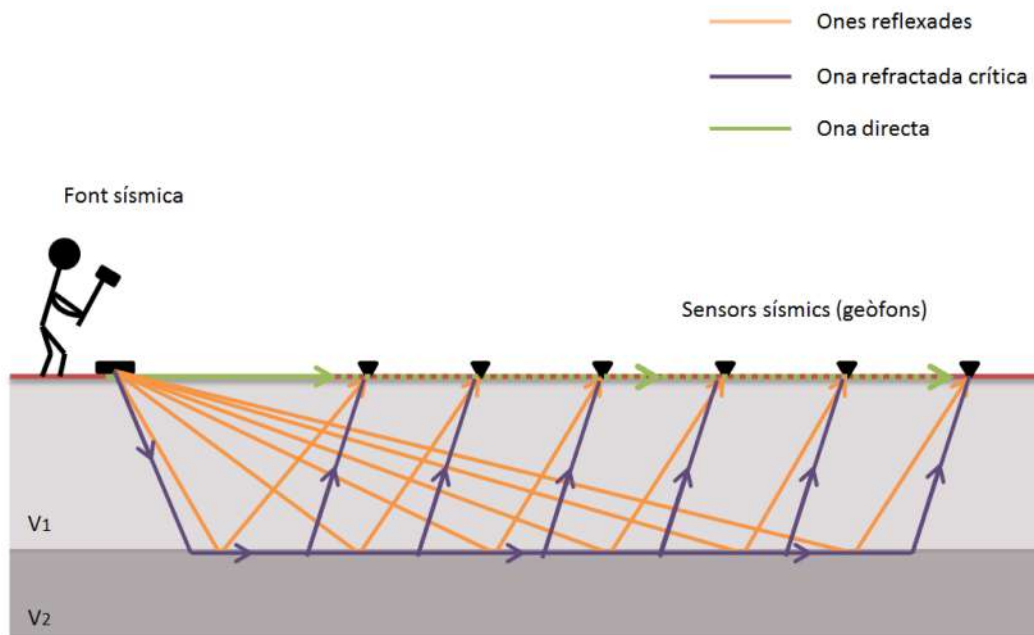


FIG. 3.9. Esquema on s'observen els diferents tipus d'ona i el seu recorregut a través d'un medi amb dues capes de velocitat diferent.

### 3.2.1. TOMOGRAFIA SÍSMICA DE REFRACCIÓ

La tomografia sísmica de refracció té com a objectiu determinar la distribució de la velocitat sísmica (model de velocitats) del medi a partir d'un procés d'inversió, on les dades d'entrada són el conjunt d'ones directes i refractades i la posició relativa entre la font i el geòfon per a cada temps d'arribada (ICGC, 2016).

El procés d'inversió és un procés iteratiu, en el qual un model inicial s'actualitza fins a arribar a un model final. Es pot dir que el problema invers aporta una descripció del subsòl ajustant les dades mesurades en superfície a un possible model del subsòl terrestre. El primer pas del procés és l'obtenció d'un model inicial, que es calcula a partir de funcions de velocitat 1D (Gebrande, 1986), derivades del pendent de les corbes distància-temps. El següent pas consisteix en calcular els temps d'arribada de les ones elàstiques en el model inicial mitjançant un traçat de raigs que es comparen amb els temps reals obtinguts de les dades de camp (Lecomte, 2000). Aquests raigs són línies que marquen la direcció d'avanç de les ones sísmiques. A partir d'aquesta diferència s'estableixen les variacions necessàries del model de velocitat per minimitzar-la (Schuster i Quintus-Bosz, 1993) i el procés es va repetint fins que la diferència, entre els temps teòrics i els temps calculats, sigui més petita que un cert valor, sent l'últim model el resultat final (figura 3.10).

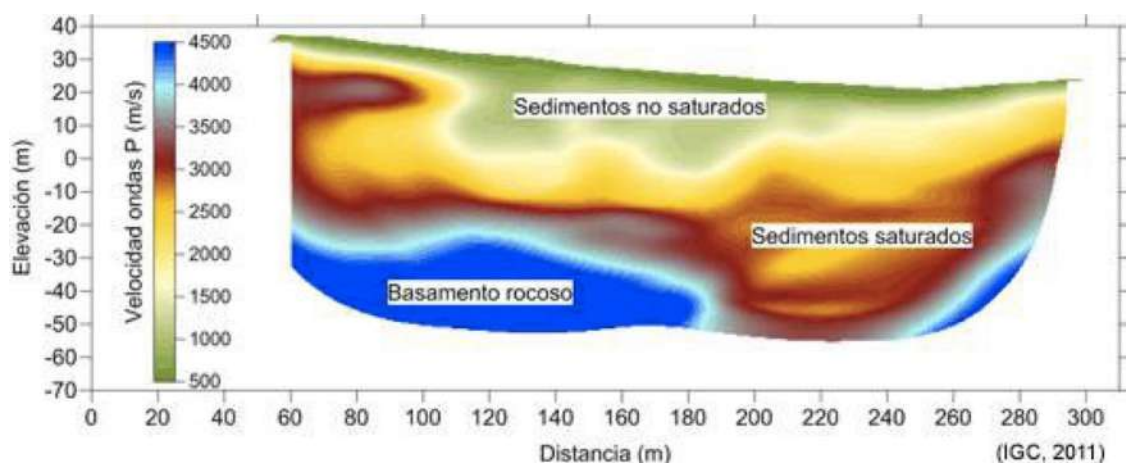


FIG. 3.10. Model de velocitat de les ones P obtingut mitjançant el mètode de la tomografia sísmica de refracció i la seva interpretació. (Extret de IGC, 2011).

Durant la campanya de camp, s'ha de tenir en compte la variació dels següents paràmetres en funció de les característiques de l'objecte d'estudi:

- *Nombre de geòfons per a la implantació:* Normalment es treballa amb un mínim de 12 geòfons, però existeix la possibilitat d'afegir-ne en funció de l'objecte d'estudi i la seva profunditat. A major nombre de receptors, major profunditat d'investigació i major representativitat.
- *Distància entre geòfons:* Determina la resolució lateral i vertical de les dades obtingudes. Per una millor resolució del dispositiu de mesura l'espaiat entre geòfons ha de ser petit, encara que impliqui un menor rendiment en la presa de dades i una menor profunditat d'investigació.
- *Nombre de tirs per a la implantació i la seva distribució al llarg del perfil:* En tomografia sísmica, el nombre mínim són 7; un a cada extrem, un central i la resta simètrics a banda i banda del central. Aquest factor limita l'estudi de gruixos i velocitats en la vertical immediatament per sota dels tirs. Com més detall requereixi l'estudi, més tirs s'efectuaran.
- *Font d'energia i tipus de mesura:* Generalment, s'utilitza un martell anomenat mall amb el que es dona un cop sobre la placa metàl·lica situada sobre el terreny. Si es vol obtenir una millor relació senyal/soroll, és convenient utilitzar una font més potent, com ara explosius o font sísmica (figura 3.11).



FIG. 3.11. Fotografies de dues fonts sísmiques diferents: font sísmica i mall, que disposa ICGC en el seu equipament geofísic.

## 4. METODOLOGIA

Tal com ja s'ha comentat, la tomografia elèctrica i la sísmica són àmpliament utilitzades per a descriure les estructures geològiques superficials de manera senzilla i amb una molt bona resolució. Es pot disposar de programes que permeten tractar les dades mesurades en el camp i obtenir models del subsòl en funció de cada paràmetre geofísic corresponent a les dues tècniques esmentades. En el cas de la tomografia sísmica de refracció s'aconsegueixen models en funció de la velocitat de les ones P ( $V_p$ ) i, en el cas de la tomografia elèctrica s'obtenen models del paràmetre de la resistivitat elèctrica ( $\rho$ ).

Quan s'obtenen models del subsòl invertint les dades de manera individual o independentment, mitjançant diferents programes geofísics, es poden apreciar discrepàncies. Això és degut a que cada mètode respon a una propietat física diferent (paràmetre geofísic) i aquestes propietats poden presentar, o no, una relació directa entre elles. Per tant, no es pot obtenir un model únic del subsòl, ja que les interfícies o els contactes determinats entre els materials poden discrepar d'una tècnica a l'altra, sent les dues correctes i no donar una resposta final clara a l'hora de fer la interpretació dels models del subsòl. Aquesta limitació és encara més important quan la geologia de la zona d'estudi és complexa.

Existeixen molts treballs on s'han proposat inversions simultànies per a produir un model unificat i reduir, d'aquesta manera, les ambigüitats en les interpretacions geofísiques. Les inversions conjuntes de diferents grups de dades han estat aplicades, i es troben descrites en els articles científics, en aquells casos en què els mètodes depenen del mateix paràmetre físic, com ara dades de resistivitat elèctrica de corrent continu (tomografia elèctrica) i mètodes electromagnètics transitoris (en ambdós casos l'observable és la mesura de la resistivitat elèctrica del medi) (Schmutz et al. 2000; Albouy et al. 2001; Athanasiou et al. 2007). Quan els conjunts de dades que s'inverteixen depenen de paràmetres físics diferents, la inversió conjunta utilitza relacions experimentals a través de les propietats petrofísiques (Berge et al. 2000; Tillman and Stocker 2000) o també similituds estructurals del model, és a dir, que els diferents mètodes que intervenen en la inversió detecten les mateixes capes geològiques (Hering et al. 1995; Lines et al. 1988). És per aquest motiu, que cada cop comença a ser més indispensable en el camp de la geofísica implementar programes d'inversió que tinguin en compte més d'un tipus de paràmetre geofísic, d'aquesta manera es redueix la incertesa inherent en el procés de la inversió, els problemes d'equivalència i d'estabilitat.

En el cas de la inversió conjunta de la tomografia elèctrica i sísmica no existeix cap relació directa entre els dos paràmetres físics, per tant la inversió s'ha de recolzar en les relacions experimentals o amb la similitud estructural del subsòl, contactes o fronteres de les diferents capes. Fent una recerca de programes lliures i/o comercials que realitzen aquesta inversió conjunta amb les tècniques de la tomografia elèctrica i sísmica, s'han trobat diferents possibilitats de les quals s'han escollit tres programaris. Aquests tres són els que m'han semblat més interessants per analitzar i profunditzar en ells.

El primer de tots és el *ZONDRES2D*, un programa comercial del qual no existeix cap versió gratuïta i que, per tant, implica una inversió econòmica que no ha pogut assumir l'ICGC fins al moment. Per aquest motiu, només m'he documentat breument del programari i no s'ha pogut realitzar cap tipus de prova. Malgrat això, el programari presenta un potencial important en la inversió de dades de manera conjunta mitjançant el mètode 'model cross gradient' o un model de capes arbitràries.

El segon programa és el *SEISRES* (Nath, S.K. et al., 2000), un programa implementat en codi Visual C++ per a un entorn de Microsoft Windows '95 (o més actual) i utilitza el concepte de programació orientada a objectes (OOP) que consisteix en la formació d'un grup d'objectes relacionats mitjançant l'ús del tipus de dades 'classe' ordenades jeràrquicament (Murray i Pappas, 1995). Aquest programa permet l'estimació de la inversió dels raigs sísmics generant un model inicial de capes i la posterior construcció quasi-2D del model elèctric a partir d'aquest últim. Per això, es creu que respon més a un esquema d'inversió seqüencial que a una inversió conjunta, però és un primer pas en la recerca. El programa inverteix les dades sísmiques de refracció i genera un model 2D inicial de capes més o menys estratificades. Després, a partir del gruix de les capes que han resultat, el model es va modificant mitjançant un procés d'inversió iteratiu on considera les dades elèctriques, per generar un model final del subsòl.

Finalment, l'últim programa és el *SUBROUTINES* implementat per Hamdan Ali (2012) amb codi Matlab per a Microsoft Windows. En aquest cas, la inversió si que és simultània utilitzant l'algorisme de gradients creuats per invertir conjuntament la resistivitat elèctrica i les primeres arribades de sísmica. La idea bàsica d'aquest algorisme és estimar quantitativament les similituds estructurals entre els models resultants de les dades elèctriques i sísmiques utilitzant el producte creuat de les seves matrius gradient i aconseguir un model únic del subsòl d'ambdós conjunts de dades.

L'estratègia proposada utilitza un factor de ponderació en la inversió de l'algorisme de gradients creuats i també utilitza diferents '*damping factor*' per a la resistivitat elèctrica i per a les dades sísmiques. El resultat serà un model final del subsòl únic satisfent ambdues dades mesurades.

#### 4.1. PROGRAMARI SEISRES

Aquest algorisme consisteix en amalgamar les rutines d'inversió de la tomografia elèctrica i de la tomografia sísmica de refracció tenint en compte un paràmetre en comú que serà, en aquest cas, la disposició geomètrica de les diferents capes del subsòl. El programa presenta moltes opcions per a fer inversions en 1D tant per a la part de les dades sísmiques com elèctriques, però jo m'he centrat en el processat de les dades en 2D. En l'article que presenta l'autor (Nath S. K., et al., 2000) l'algorisme està verificat amb exemples sintètics que simulen aqüífers amb una complexa lito-estratigrafia i, posteriorment, ha estat aplicat a unes dades reals.

Aquest mateix procés es realitza en aquest treball on, en primer lloc s'ha testejat el programa amb les mateixes dades sintètiques proporcionades per l'autor i, posteriorment s'ha aplicat a les dades reals adquirides en un perfil d'aproximadament 350 m al Delta de l'Ebre.

A continuació es presenta el diagrama de flux del programa (figura 4.1) que ha realitzat l'autor, per tal d'observar els passos seqüencials que es produeixen per a obtenir el model final. En aquest diagrama s'han assenyalat els passos que es fan servir alhora de plantejar la inversió seqüencial de les dades sísmiques i elèctriques. Un petit resum dels diferents passos es presenta a continuació.

##### A) Processat tomografia sísmica:

1. Lectura de les primeres arribades.
2. Generació del gràfics temps-distància (T-D) per a cada tir. L'usuari ha d'identificar el punts de trencament de la corba, tant per la directa com per a la inversa.
3. Generació del temps de viatge de l'ona a través de l'extrapolació.
4. Determinació de la posició  $X_c$  (distància crítica) i creació del gràfic.
5. Determinació de les velocitats dels pendents dels segments de la corba T-D.
6. Estimació del valor de la fondària per aquells punts de la superfície on s'ha identificat un punt de trencament.
7. Es mostra la secció 2D del model de velocitat estimat.



B) Processat tomografia elèctrica:

1. Lectura de les dades de les pseudoseccions elèctriques (o part d'elles).
2. Utilització dels gruixos del model de velocitat estimat en apartat A per construir un model de resistivitat elèctrica inicial.
3. Procés iteratiu tenint en compte l'ajust de les corbes de resistivitat elèctrica amb la corba mesurada en el camp.
4. Obtenció d'un models quasi 2D que té en compte el model de velocitats previ que actua com a factor de control en la inversió de les dades elèctriques.

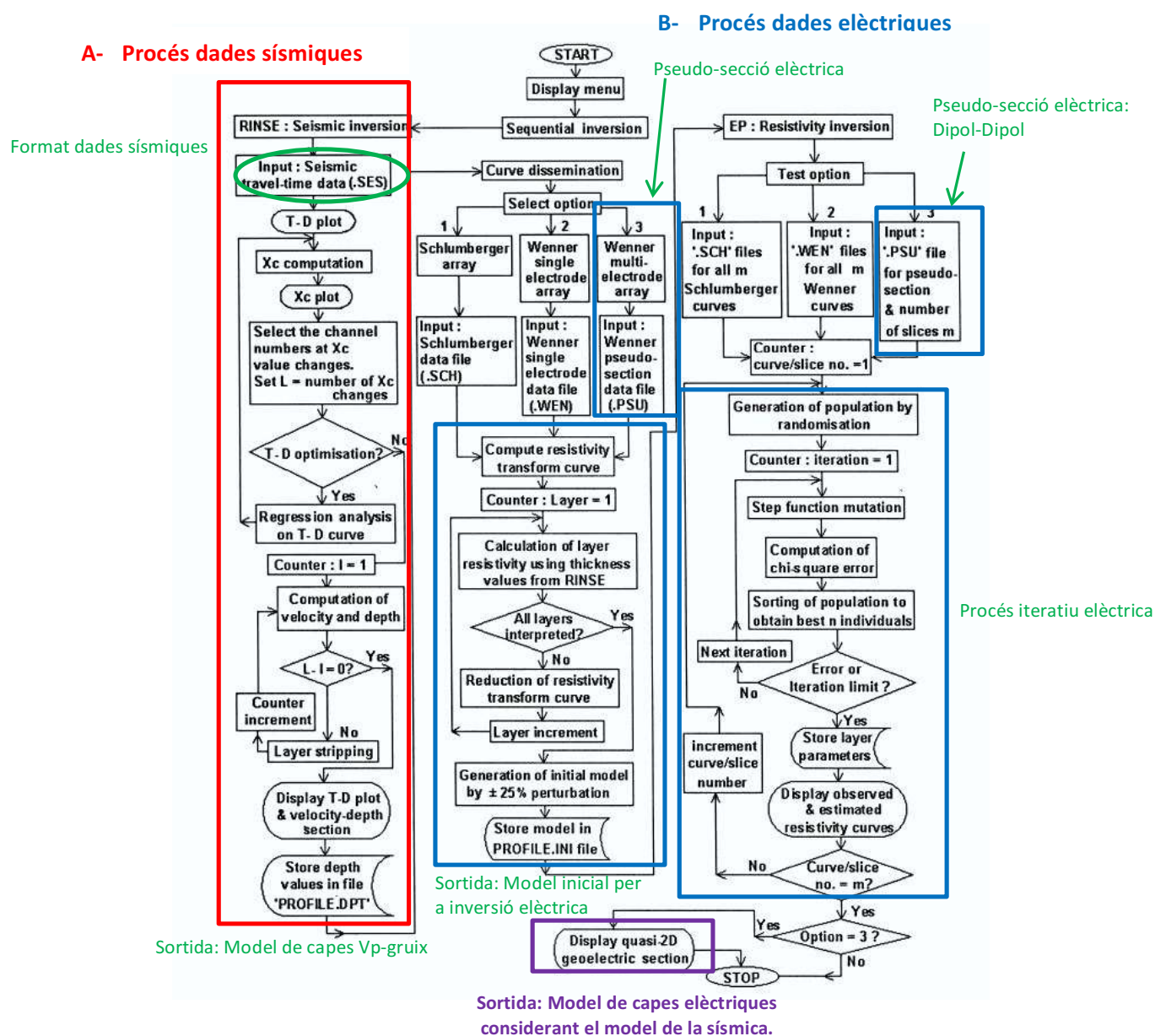


FIG. 4.1. Diagrama de flux del programari SEISRES.

La part gràfica on s'observen les pantalles d'interacció de l'usuari amb el programari es troben descrites en l'apartat 6 del treball on s'utilitzen les dades reals del Delta de l'Ebre.

#### 4.2. PROGRAMARI SUBROUTINES HAMDAN ALI

L'objectiu principal de la inversió de les dades geofísiques és trobar un model definit per uns paràmetres geofísics concrets que reproduïxin les dades observades. En el procés d'inversió proposat en aquest algorisme, com en molts d'altres, és necessari resoldre el problema directe per a tots els paràmetres involucrats. Existeix un ampli nombre de tècniques numèriques que troben la solució del problema directe tant per a la resistivitat com per al temps d'arribada de les ones.

En aquest algorisme el mètode d'elements finits 2.5D (Tsourlos et al., 1998) s'implementa per a resoldre el problema directe del mètode elèctric ja que aporta una millor estimació de la resposta elèctrica al considerar el comportament 3D del potencial elèctric (Dey and Morrison 1979).

Pel cas de la sísmica, l'algorisme utilitza un mètode de flexió de raigs optimitzat que soluciona el problema directe de la sísmica mitjançant '*beta-splines*' per a la parametrització dels raigs. Per a l'aproximació 2.5D s'utilitza un eix de tercera dimensió de mida petita (Moser 1991; Soupios et al. 2001).

En ambdós casos, la solució del problema directe inclou equacions no lineals que es tracten amb l'aproximació de Taylor de primer ordre. Per a la realització de la inversió simultània del parell de dades (elèctrica i sísmica) es dissenya una malla comú basada en elements finits que permet dur a terme la inversió a través del mètode *Cross-Gradient*. Per això és necessari que el vector gradient dels models de la resistivitat elèctrica i de la velocitat sísmica sigui paral·lels (igual o oposats) en els punts on existeix una variació dels corresponents paràmetres físics. Això vol dir que els contorns de les diferents capes, detectades per ambdós mètodes, estan localitzades en el mateix punt espacial (mateixa posició).

En la solució d'aquest algorisme d'inversió basat en Gallardo i Meju (2004) (*Lagrange multiplier*) s'afegeix un factor de ponderació ( $W_n$ ) entre 0 i 1. Quan la inversió vol que sigui independent en cada tècnica geofísica s'escull 0. Pel contrari, la inversió conjunta es produeix amb el valor de 1.

La inversió s'inicia de manera independent i després, el factor de ponderació va augmentant de manera gradual fins a 1. També s'introdueixen uns factors que controlen la sensibilitat de cada tècnica (*damping factor*) en el resultat final i, per tant, poden afegir un biaix en el model final de la inversió.

Els passos que cal seguir en aquest cas són:

1. Lectura de les dades de la tomografia elèctrica.
2. Lectura del fitxer de control de les dades sísmiques amb els paràmetres necessaris.
3. Construcció de la malla comuna a ambdós mètodes on es col·locaran els elèctrodes i els geòfons.
4. Definició dels models inicials tant elèctric com sísmic. En el model sísmic cal especificar el nombre de capes que es consideren i els seus valors de velocitat P i gruix de la capa.
5. Comença el procés iteratiu simultani on s'observa com a sortida de cada iteració el model elèctric i el model sísmic en 2D.

Igual que en l'altre programari, la part gràfica on s'observen les pantalles d'interacció de l'usuari amb el programari es troben descrites en l'apartat 6 del treball on s'utilitzen les dades reals del Delta de l'Ebre.

## 5. APLICACIÓ A DADES REALS

### 5.1. ZONA D'ESTUDI

#### 5.1.1. SITUACIÓ GEOGRÀFICA

Les dades utilitzades en aquest treball procedeixen de les campanyes de camp que es van realitzar per tot el Delta de l'Ebre amb les tècniques de tomografia elèctrica (ERT) i de sísmica de refracció en 2D, dins el projecte EBRO-ADMICLIM que forma part del projecte LIFE de la UE. Malgrat tenir molts perfils distribuïts per tota l'extensió del Delta de l'Ebre, s'ha escollit el perfil de La Granadella. Aquest perfil està situat al marge esquerre del Delta (figura 5.1), i va ser escollit perquè, segons les inversions independents, presenta una estructura senzilla de capes horitzontals i no està influenciat per cap intrusió salina. Això fa que la seva resposta elèctrica i sísmica sigui menys complexa, i per tant, més senzill serà controlar els models resultants per realitzar la inversió i la interpretació conjunta.

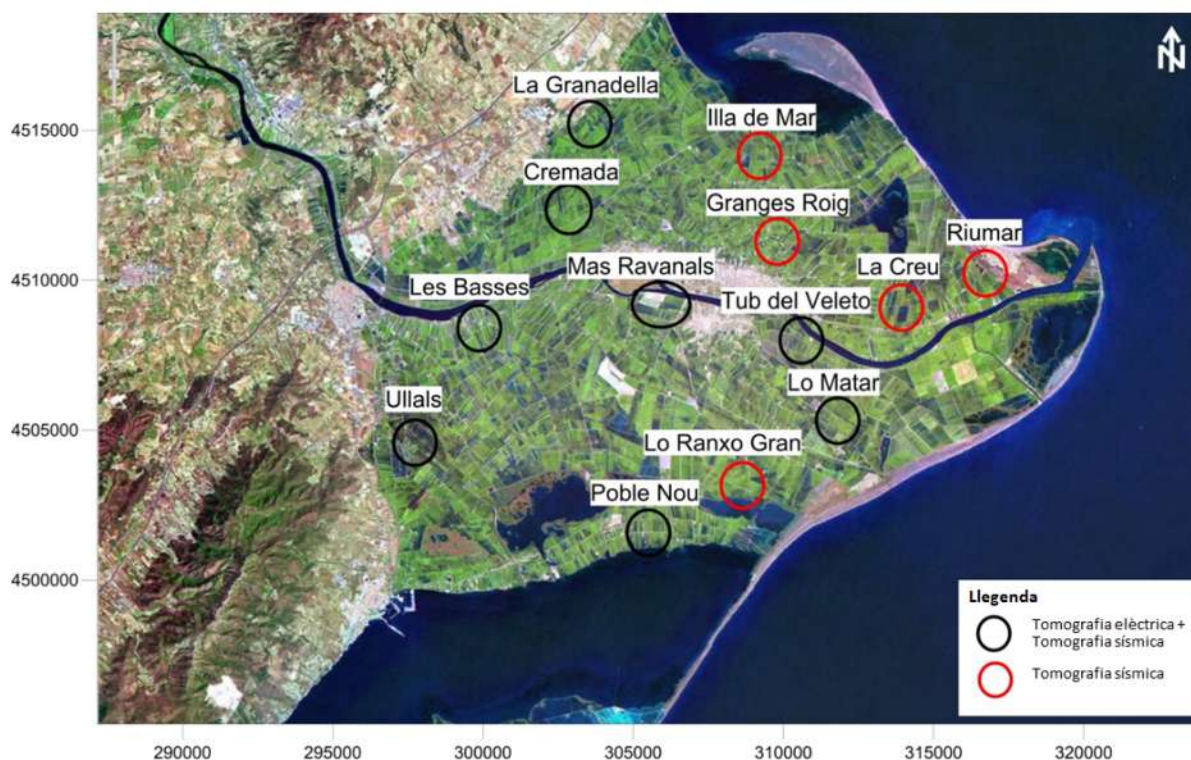


FIG. 5.1. Ortofoto amb la localització de les zones investigades en el Delta de l'Ebre. Escala 1/25000 (ICGC, 2014). Els cercles de color negre marquen les zones on s'han realitzat adquisicions de tomografia elèctrica i sísmica de refracció.

### 5.1.2. ENTORN GEOLÒGIC

El Delta de l'Ebre està format per l'aportació de materials detrítics fluvials que arriben del riu al mar, després de travessar la Serralada Prelitoral. Aquests materials (sorres i fins) són, posteriorment, redistribuïts pels processos litorals i eòlics. És la formació litoral d'edat més recent del país (<6000 anys), situada en l'Holocè. Els materials que ho constitueixen són tots detrítics d'origen fluvial o fluvio-marins, sorres i llims, amb una contribució de material orgànic i bioclàstic, tant en els sediments de les llacunes com en els prodeltaics. A l'est i fora de l'ambient deltaic afloren materials del Cretàcic, bàsicament calcàries i margues.

El delta del Ebre es caracteritza per ser un cos sedimentari amb forma de ballesta amb una superfície emergida de 320 Km<sup>2</sup> i una superfície submergida d'aproximadament 2.172 Km<sup>2</sup> (Maldonado, 1972).

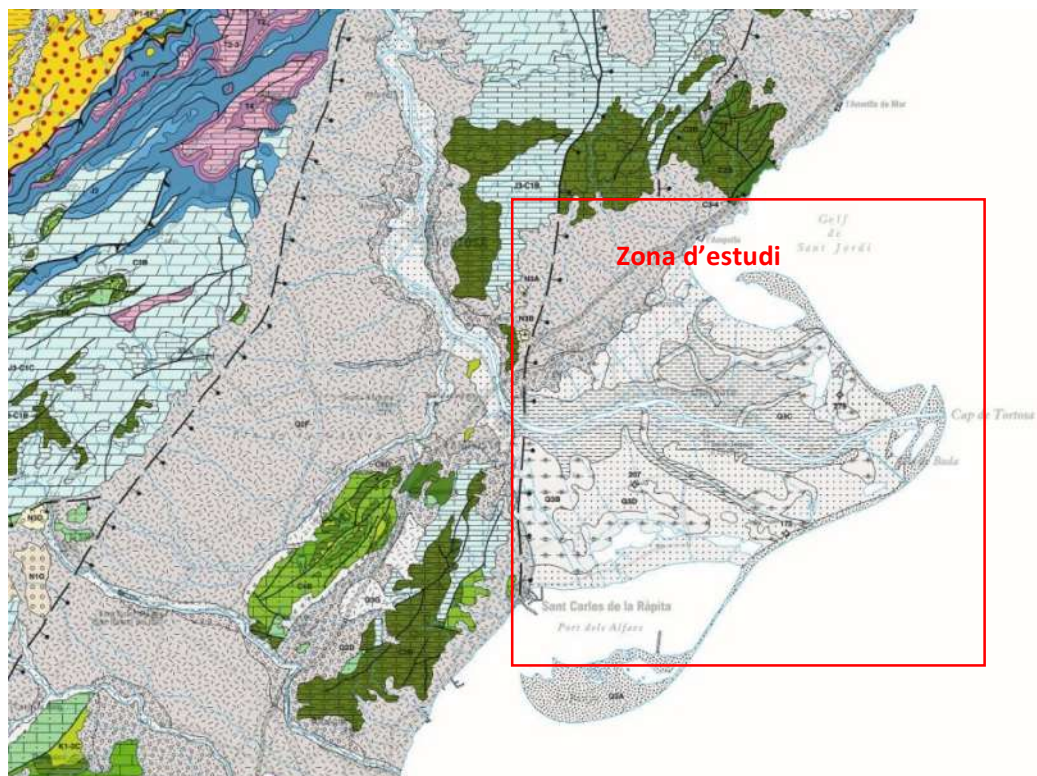
Un front deltaic d'uns 50 Km de longitud format per la pròpia desembocadura, les dues fletxes que li donen la morfologia d'arcs de ballesta: el Fangar, situat al NO i els Alfacs, situat al S, i les dues badies delimitades per les pròpies fletxes. El resultat del conjunt és la formació de diferents tipus de dunes a la part emergida del Fangar i de barres a la submergida que es desplacen en sentit oposat. La desembocadura del riu, és un dels elements de morfologia més variable, ja que hi interaccionen tant els factors marins com els fluvials donant lloc a canvis molt ràpids.

La plana deltaica està constituïda pels sediments corresponents als canals, els dipòsits formats per acreció vertical, els dipòsits de desbordament dels canals (plana d'inundació), i pels sediments de les llacunes. En aquest estudi, com s'ha escollit el perfil de La Granadella s'espera trobar sorres, graves i llims (figura 5.2).

El prodelta és la part del delta submergit que es desenvolupa a partir del front deltaic i s'estén fins la plataforma continental. En fondària hi ha un pas progressiu a llims i fangs prodeltaics, que constitueixen el cinturó de fangs del delta.

El conjunt del delta presenta una subsidència diferencial deguda per una banda a la resposta isostàtica del marge continental, i per altra a la compactació dels materials lutítics recents. Ambdós moviments són en el mateix sentit, d'enfonsament del conjunt, i si tenim en compte el d'ascens del nivell marí, tots els elements juguen en contra de l'estabilitat deltaica.





## CENOZOIC

### Quaternari

#### Holocè

- Q 3
- |   |   |   |   |
|---|---|---|---|
| A | B | C | D |
|---|---|---|---|
- A) Sorres (platges i dunes). B) Lutites amb matèria orgànica i torba (aiguamolls reberts, canals abandonats). C) Llims i sorres (levées). D) Graves, sorres i llims (plana al·luvial, deltaica).

#### Plistocè mitjà i superior

- Q 2
- |   |   |   |   |
|---|---|---|---|
| D | E | F | G |
|---|---|---|---|
- D) Graves (terrasses i glacis). E) Argiles i còdols (col·luvions). F) Conglomerats, gresos i lutites (cons de dejecció). G) Blocs i argiles (til·lita, morenes).

## MESOZOIC

### Cretaci

#### Aptià mitjà - superior

- C 4
- |   |   |   |
|---|---|---|
| A | B | C |
|---|---|---|
- A) Margues i margocalcàries (Senyús). B) Calcàries bioclàstiques amb rudistes i orbitolines (Senyús, Calcaires Urgo-Aptiens, Villarroya de los Pinares, Forcall). C) Dolomies grises vacuolars (Garraf).

#### Barremià

- C 2
- |   |   |   |   |
|---|---|---|---|
| A | B | C | D |
|---|---|---|---|
- A) Calcàries bioclàstiques i esculloses (Urgo-Barremien). B) Calcàries i argiles laterítiques (Cantaperdius). C) Calcàries micrítiques amb lignits (calcàries amb anèl·lids, calcàries amb caròfits). D) Calcàries i calcarenites localment dolomititzades (el Perelló).

FIG. 5.2. Mapa geològica de la zona d'estudi amb la llegenda corresponent. Escala 1/250000 (ICC, 2002).

## 5.2. DESCRIPCIÓ DEL PROJECTE LIFE EBRO-ADMICLIM

Les zones deltaïques presenten subsidència (enfonsament del terreny) degut al procés geològic d'acumulació de sediments i la seva posterior compactació, modificant de forma natural i constant la cota topogràfica del terreny (Allen i Allen, 2005). La taxa natural d'acumulació-compactació és un dels factors que influeixen, juntament amb la dinàmica litoral i els canvis del nivell del mar, en la preservació, augment o disminució de la superfície del terreny de la plana deltaica (Jouet et al, 2008).

Tenint en compte que un dels principals objectius del projecte LIFE és la acreció vertical controlada que permeti preservar la cota del terreny en la plana deltaica, és important conèixer l'extensió i la velocitat de la subsidència per a la identificació de les zones que necessitin major o menor deposició controlada de sediments. Per una altra banda, es coneix que la subsidència està controlada per la granulometria existent en la columna de sediments. Es produeix sobretot, per la compactació de paquets de sediments amb una potència important d'argiles i/o material orgànic quan canvia el seu contingut d'aigua (consolidació/dessecació) (Holzer, 1948; Galloway et al., 1999). Aquests processos tenen lloc sobretot, en els sediments superficials, que són els dipòsits més recents i pateixen els canvis geològics i antròpics més ràpids i més intensos de tot el paquet sedimentari deltaic.

Per tant, la caracterització de la subsidència en la plana del Delta de l'Ebre té dos vessants: la primera és identificar les zones on es manifesta la subsidència en la plana deltaica així com mesurar les velocitats amb les que se efectuen; la segona és caracteritzar els materials més superficials per fer un reconeixement de les columnes sedimentaries més susceptibles a mostrar subsidència. Dins del projecte EBRO-ADMICLIM, aquest reconeixement precís del subsòl es realitza amb la caracterització geofísica. Aportant la geometria i l'extensió dels paquets sedimentaris superficials en base de les seves propietats geofísiques amb les metodologies superficials adients per aquests objectius.





PERFIL	MÈTODE	NOM	Xinici	Yinici	Xfinal	Yfinal
LA GRANADELLA	TOMOGRAFIA ELÈCTRICA	P15	303625	4515577	303427	4515282
		P16	303490	4515378	303293	4515083
		P17	303362	4515177	303154	4514889
	TOMOGRAFIA SÍSMICA		303590	4515524	303167	4514907

TAULA 5.1. Coordenades UTM (31N, ETRS89) dels punts inici i final del perfil de tomografia elèctrica i sísmica a la zona de La Granadella. (ICGC, 2016)

### 5.3.1. PARÀMETRES D'ADQUISICIÓ

A continuació es presenten els paràmetres d'adquisició de les dades de camp i les característiques de la instrumentació geofísica necessària per a realitzar el procés en el camp, tant per a la tomografia elèctrica com pel registre de la sísmica de refracció.

#### 5.3.1.1. TOMOGRAFIA ELÈCTRICA

La tomografia elèctrica es va realitzar amb l'equip Syscal Pro, on es pot veure en les següents figures (5.4 i 5.5) l'equip i el muntatge durant les adquisicions de dades.



FIG. 5.4. Resistímetre Syscal Pro (imatge esquerra) utilitzat per a l'adquisició dels perfils de tomografia elèctrica i detall de la connexió entre un els elèctrodes d'acer i el cable elèctric utilitzat (imatge dreta) (ICGC, 2016).



FIG. 5.5. Imatge del cable elèctric estès sobre la superfície del terreny i detall d'un elèctrode durant l'adquisició del perfil de La Granadella de la línia de tomografia elèctrica (ICGC, 2016).

La instrumentació a l'hora de realitzar el treball de camp per a la tomografia elèctrica és el següent:

- *Resistímetre (SYSCAL)*: És el que s'encarrega d'executar automàticament tota la seqüència de mesures configurades prèviament a través de la interfície de l'instrument o amb el programari d'ordinador '*ElectroPro*', així com de verificar que totes les connexions estiguin bé i emmagatzemar digitalment totes les dades obtingudes.
- *Font d'energia*: Bateria de 12V que anirà connectada directament al resistímetre i permet un control automàtic de la injecció.
- *Cable elèctric*: 6 bobines de cable elèctric amb 12 connexions cadascun amb una separació de 5 m. La longitud total del perfil és de 355 m.
- *Elèctrodes*: 72 barres d'acer inoxidable d'uns 20 cm que es claven en el terreny i estan separats entre ells 5 metres.
- *Connectors*: Petits cables de coure amb pinces als extrems que connecten els elèctrodes amb el cable elèctric.
- *Pc portàtil*: Ordinador de camp que inclou el software que ens permet determinar les variables de treball (tipus de dispositiu, número d'elèctrodes, separació entre ells,

número de mesures a realitzar, etc.) i també ens permet crear la configuració (ElectrePro) i per altre costat processar i visualitzar els resultats obtinguts amb els programes 'Prosyl' i 'Res2dinv'.

L'adquisició de les dades es va realitzar amb el dispositiu dipol-dipol, ja que aquest dispositiu permet obtenir models de resistivitat amb una elevada resolució lateral i una resolució vertical adequada, és a dir, la distribució de la sensibilitat per aquest dispositiu és elevada en general, ja que arriba a detectar estructures independents però properes, sense captar els sorolls del medi. El principal inconvenient és la relació senyal/soroll del dispositiu en distàncies llargues, però en aquesta zona es van obtenir bons resultats gràcies a que és una zona molt aïllada i els materials conductius de la superfície faciliten la transmissió del corrent elèctric.

#### 5.3.1.2. TOMOGRAFIA SÍSMICA DE REFRACCIÓ

El registre sísmic es va realitzar amb l'equip Summit (DMT) de 24 canals amb el sistema Land Streamer, on es pot veure en les següents figures (5.6 i 5.7) l'equip i el muntatge durant les adquisicions de dades. El nombre de tirs en total del perfil de La Granadella és de 61 tirs que correspon a 847 m de longitud total del perfil. En aquest treball però, només treballarem amb els tirs que es troben dins els primers 355 m de longitud, que limiten la tomografia elèctrica.



FIG. 5.6. Equip Summit DMT, utilitzat pel registre d'ones superficials, més la bateria transportats mitjançant un carro i una caixa de plàstic (ICGC, 2016).





FIG 5.7. Imatge del sistema Land Streamer estès sobre la superfície del terreny durant l'adquisició de la línia sísmica de La Granadella amb el detall d'uns dels geòfons amb sistema Land Streamer.

La instrumentació utilitzada en el camp per a la tomografia sísmica de refracció amb el sistema de Land Streamer és la següent:

- *Sismògraf Summit DMT*: És l'encarregat de registrar les mesures preses pels diferents geòfons i té un total de 24 canals.
- *Dispositiu trigger*: És un cable amb dispositiu piezoelèctric en un dels extrems, el qual va acoblat sobre la font sísmica i que serveix per referenciar amb exactitud l'inici de l'ona sísmica.
- *Geòfons per Land Streamer*: Són els encarregats d'enregistrar la component vertical (ones P). S'han utilitzat 24 geòfons de 4.5 Hz de freqüència natural separats entre ells 3 m.
- *Cable Land Streamer*: 1 cable amb 24 connexions espaiats 5 m. La longitud total del cable és de 115 m.

- *Font d'energia:* Font P-S AWD Model 100 muntada sobre el vehicle amb el qual es generaran les ones sísmiques. El primer geòfon està separat 12 m de la font (figura 5.8)



FIG. 5.8. Font muntada sobre el vehicle utilitzat per a la generació de les ones sísmiques (ICGC, 2016)

- *Pc portàtil:* Ordinador amb el software d'adquisició *Summit Acquisition Tool*.

#### 5.4. PROCESSAT DE DADES

L'estratègia de la inversió conjunta proposada pels programaris *SEISRES* i *SUBROUTINES* va ser aplicada a les dades adquirides en el perfil de La Granadella, dins del projecte LIFE dut a terme en el Delta de l'Ebre. El perfil és de 355 metres de longitud en ambdós mètodes (elèctric i sísmic). Els resultats procedents de les testificacions litològiques en sondeigs indiquen una formació horitzontal formada per alternances de sorres, argiles i llims, i graves, fins a una fondària aproximada de 30 metres.

Com a breu recordatori de les característiques de la implementació d'ambdós mètodes podem dir que: les dades van ser adquirides aplicant la configuració dipol-dipol per a la tomografia

elèctrica amb 72 elèctrodes separats 5 m entre ells. Les dades de tomografia sísmica de refracció estan adquirides des del mateix origen amb 14 tirs (font sísmica) i amb la línia de geòfons col·locats cada 3 m entre ells. El tir està a 12 m del primer geòfon.

Per tenir una bona verificació de la inversió conjunta primer s'ha d'obtenir un model del subsòl que s'ha determinat a partir de les dades independents, tant d'elèctrica com de sísmica, per després comparar els resultats (fronteres entre les litologies).

#### **5.4.1. INVERSIÓ INDEPENDENT DE LES DADES ELÈCTRIQUES**

El procés d'obtenció d'un model de distribució de resistivitats elèctriques independent es durà a terme mitjançant un procés d'inversió. Per això, el processat requereix de l'ús de dos programaris diferents.

En primer lloc, s'utilitzarà el software '*PROSYS II*', el qual ens permetrà transferir, editar, netejar, processar i exportar les dades mesurades en superfície extretes amb el resistímetre (SYSCAL) i representar-les en forma de pseudosecció.

- Aquest software permet qualsevol tipus de configuracions, però en aquest cas es triarà la configuració dipol-dipol perquè és amb la que s'han fet les mesures. També caldrà ajustar l'espaiat ' $a$ ' entre elèctrodes per tal que els valors mesurats siguin coherents.
- A continuació, un cop definits els paràmetres pel processat de les dades es durà a terme el filtratge, on s'eliminaran les dades observades que siguin incoherents amb les dades veïnes (el comportament elèctric del subsòl ha de ser suau sense canvis bruscos en els valors de la resistivitat elèctrica) o negatives. En aquest filtratge es poden eliminar dades independents o nivells sencers, inclús es pot posar un llindar superior en l'error per tal de crear el fitxer de dades òptim.
- Finalment, es podran visualitzar les dades en forma de pseudosecció variant l'escala de valors per tal de ressaltar aquelles característiques que més ens interessin. Un cop s'hagi decidit l'arxiu de dades òptim s'exportarà en format *Res2dinv* per tal de realitzar la inversió.
- En el cas de tenir topografia, aquesta s'hauria d'incloure en aquesta part del processat. En aquest treball, però, la topografia es considera menyspreable.

En segon lloc, s'utilitzarà el software 'Res2dinv' el qual permet obtenir un model i comparar la seva resposta (dades calculades) amb les dades mesurades al camp. L'ajust d'aquest model es determinarà amb l'error a partir de la diferència entre les dades calculades i les dades mesurades (RMS).

El primer pas que s'ha de realitzar amb aquest software, un cop s'hagin carregat i llegit correctament les dades mesurades del camp (figura 5.9), és configurar la malla per a realitzar la resolució del problema directe amb la màxima precisió. En aquest estudi s'ha utilitzat una malla de quatre nodes (figura 5.10) i s'aplica el mètode dels elements finits que aporta resultats més acurats en la resolució del problema directe.

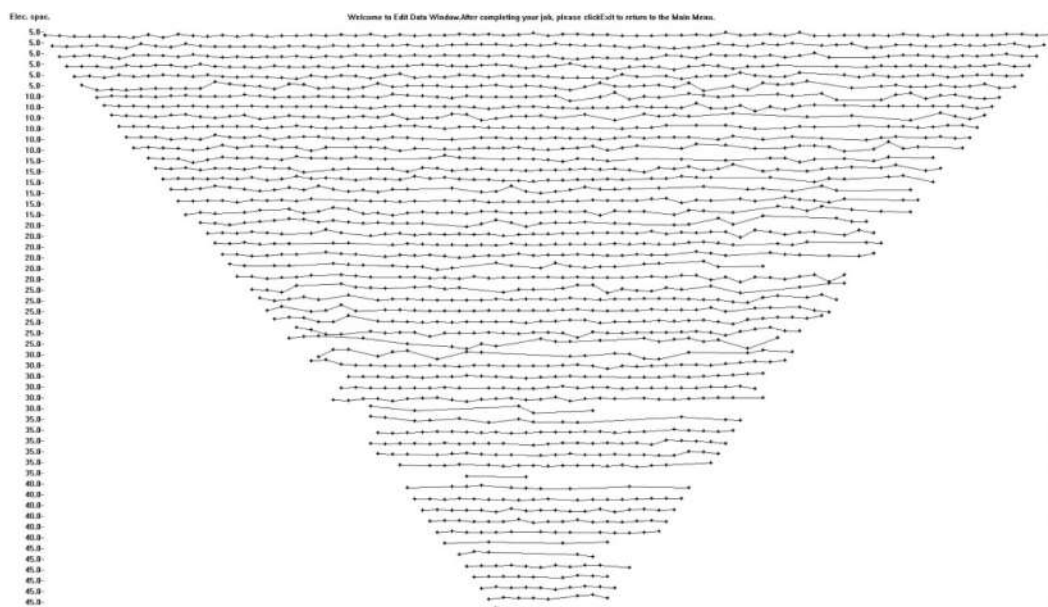


FIG. 5.9. Imatge del fitxer òptim de les dades observades del perfil de La Granadella en forma de pseudosecció, per a la visualització dels errors.

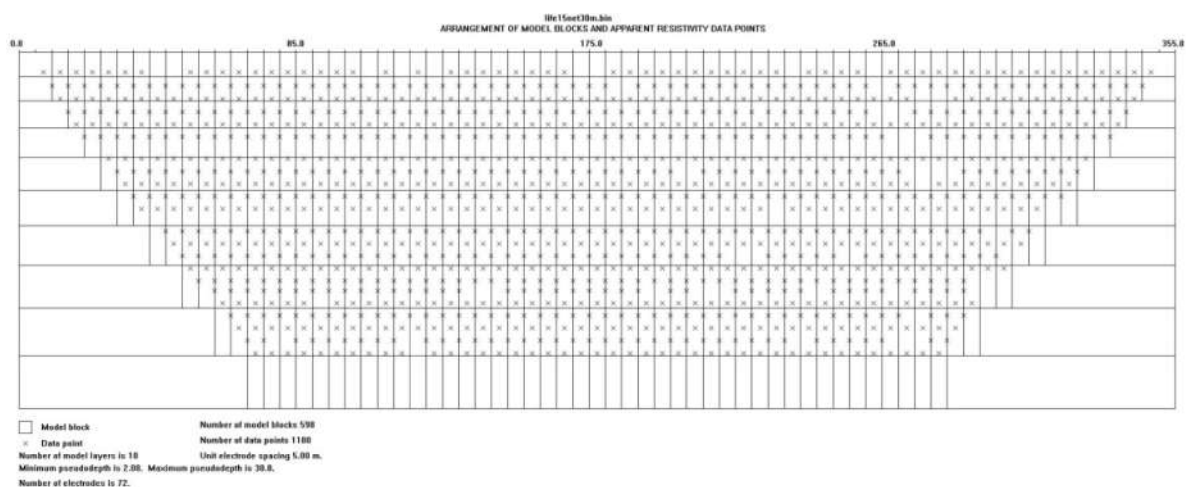


FIG. 5.10. Imatge de la malla refinada utilitzada en la inversió independent de les dades de la tomografia elèctrica del perfil de La Granadella.

Tot seguit, es duu a terme el procés d'inversió independent amb un algorisme d'inversió suau, el qual dóna un model de resistivitat del terreny realista en termes de geometria de formació mitjançant la comparació de la resistivitat mesurada i la resistivitat calculada (figura 5.11).

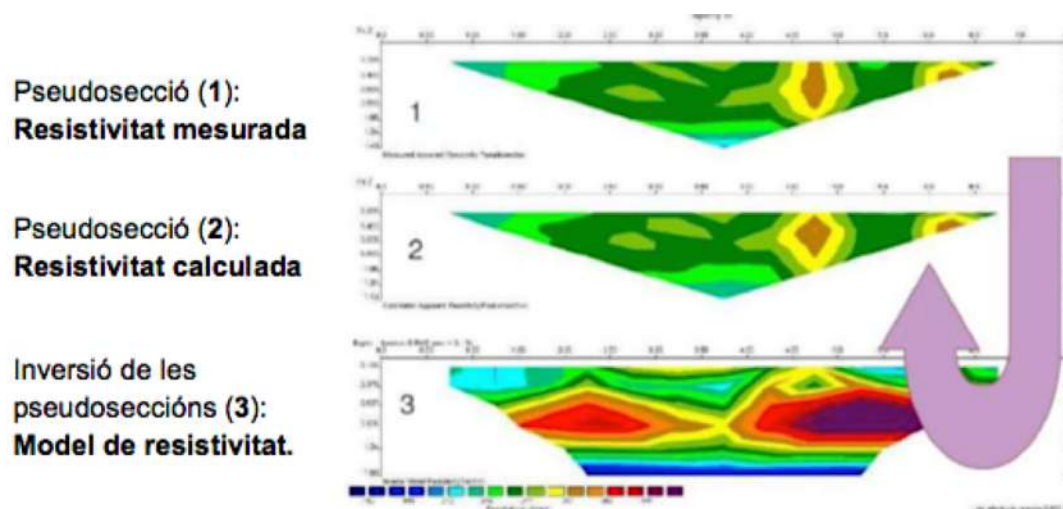


FIG. 5.11. Imatge extreta i editada del software Res2dinv on es poden veure les diferents fases del procés d'inversió (Puig, 2016).

Entre els diferents mètodes d'inversió disponibles en el programari s'utilitzarà el que més s'ajusti a la zona d'estudi, podent triar entre: *smoothing*, *robust* o *combined inversion*. En aquest cas es farà ús del *combined*, el qual permet una inversió mixta que es troba entre la suau i la robusta. Aquesta introdueix algun tipus de restricció en les dades i combina els algorismes de *Marquard* i *Occam* en el procés de la inversió.

Un cop dut a terme el procés d'inversió, i tenint en compte el valor de l'ajust (RMS) del model final respecte a les resistivitats mesurades, es modificarà el model inicial de resistivitats del subsòl, i es repetirà el procés anterior fins que aquest error sigui el més òptim o més petit possible. Així, després d'una sèrie d'iteracions, s'assoleix un model final de resistivitats elèctriques del medi que s'ajusta a les resistivitats aparents mesurades i, a més a més, el model presenta un sentit geològic fins els 20 metres de fondària (figura 5.12).

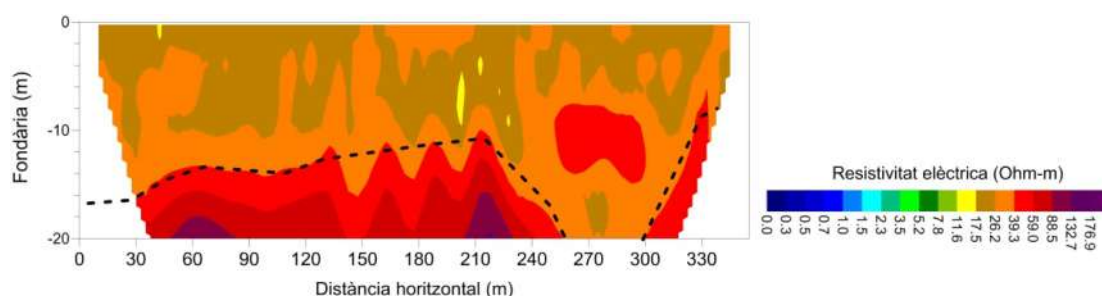


FIG. 5.12. Imatge del model final que resulta de la inversió independent de la tomografia elèctrica del perfil de La Granadella fins els 20 m de fondària.



### 5.4.2. INVERSIÓ INDEPENDENT DE LES DADES SÍSMIQUES

El processat de les dades de camp de la tomografia sísmica de refracció s'ha realitzat mitjançant l'ús del software *Rayfract*, el qual permet dur a terme el reconeixement dels temps d'arribada de les ones elàstiques per una banda, i per una altra banda permet crear el model inicial de velocitats i realitzar el procés d'inversió independent.

El primer pas serà crear un nou directori pel perfil de la Granadella i s'introduirà una sèrie de dades per tal que aquest estigui ben definit. En aquest apartat és important delimitar amb exactitud l'espaiat entre els receptors (figura 5.13).

A continuació, s'importaran tots els fitxers corresponents a cada tir realitzat. Per a dur a terme aquest pas, el programari ens demanarà una sèrie de dades les quals s'hauran de reomplir amb les observacions fetes a camp, com: nombre de tir, distància respecte al geòfon més proper, desplaçaments laterals de la posició de tir respecte la línia sísmica, temps d'adquisició i d'altres (Puig, 2016).

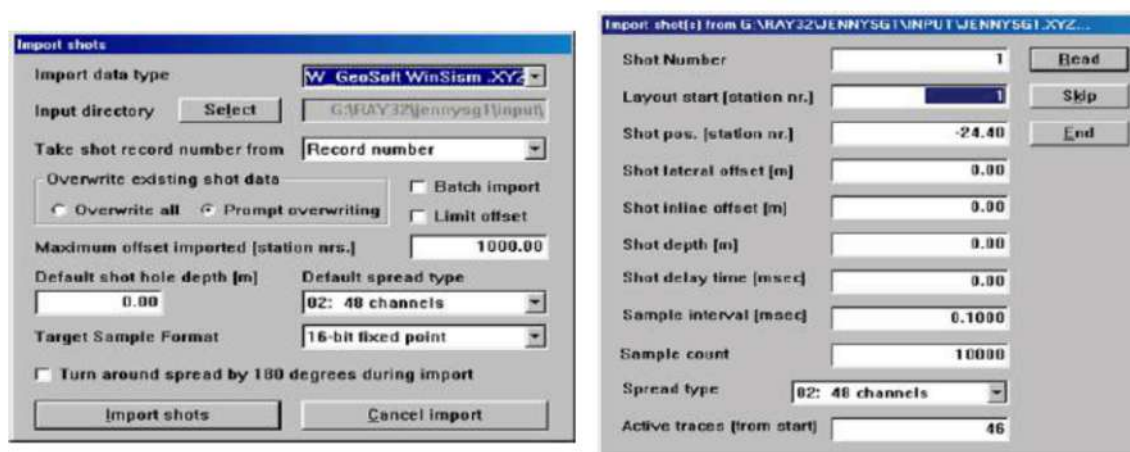


FIG. 5.13. Imatge extreta del software *Rayfract* on es mostren els passos a seguir per importar els fitxers amb les dades sísmiques registrades a camp.

Un cop s'hagin importat tots els fitxers, s'obrirà una finestra on es podrà veure la posició relativa entre font i geòfon per a cada temps d'arribada.

El software per defecte ens fa un '*Picking*' (marcatge) automàtic dels temps d'arribada per a cada traça de cadascun dels tirs i per cada un dels receptors (figura 5.14). Aquests temps d'arribada són els que seran analitzats i, en el cas de ser incoherents a causa de factors externs com el vent, soroll acústic o altres, seran modificats o eliminats.

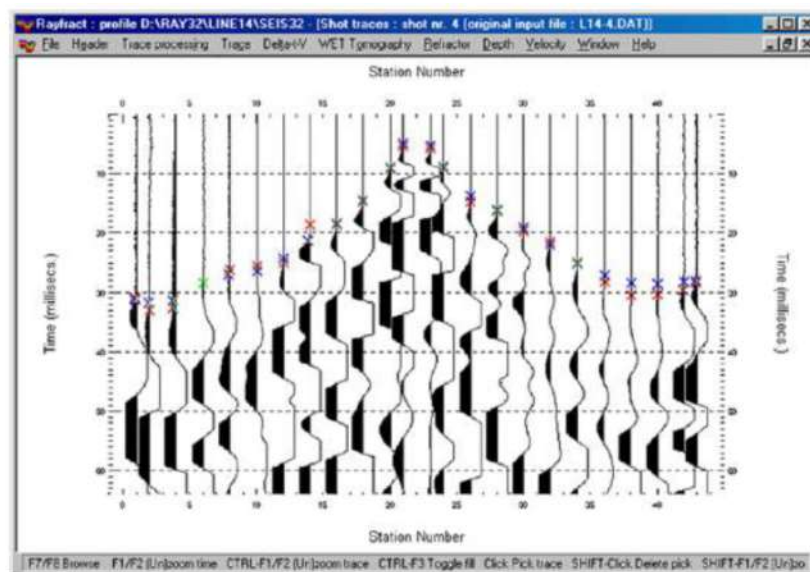


FIG. 5.14. Imatge extreta del software Rayfract on es pot observar un registre amb les dades de temps d'arribada identificats amb una creu.

Quan ja s'ha realitzat el 'Picking' s'obtindrà un gràfic amb els temps d'arribada d'ones directes i refractades crítiques respecte la posició de l'estació receptora (figura 5.15).

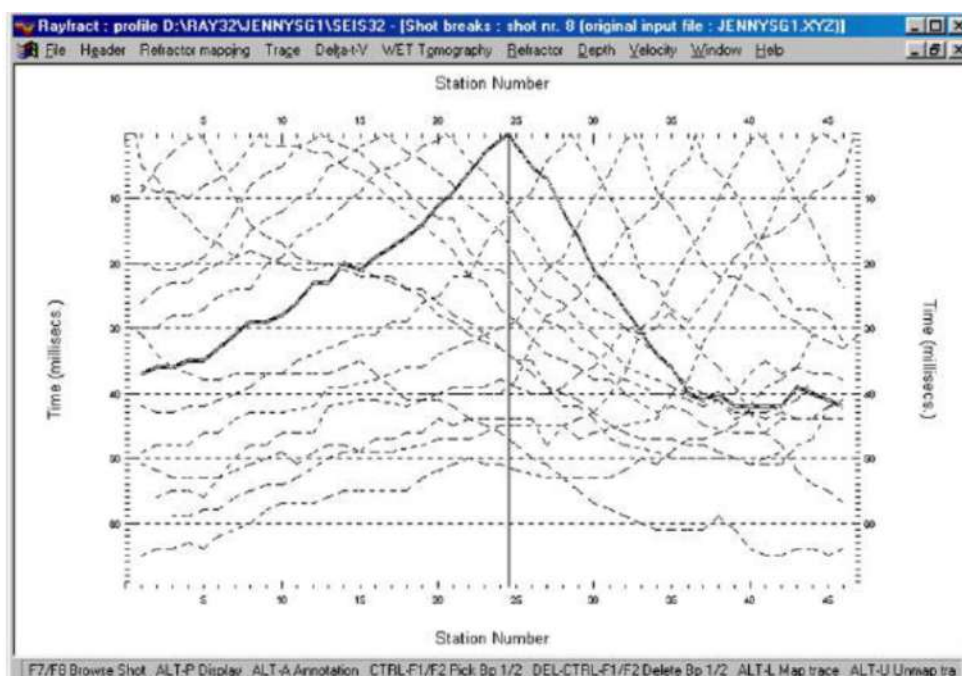


FIG. 5.15. Imatge extreta del software Rayfract on es pot veure les posicions relatives entre la font i el geòfon.

Seguidament, s'ha de triar el tipus de mètode per tal d'obtenir el model inicial de velocitats d'entre els següents: *Delta-t-V* o *Smooth gradient*, en aquest treball s'ha triat el *Smooth gradient*, per ser el que introdueix menys artefactes a la inversió al estar basat en un model 1D amb gradient de velocitats.

Finalment, es calculen els temps d'arribada de les ones refractades en el model inicial i, aquestes dades mesurades, es comparen amb els temps reals obtinguts de les dades de camp. Aquesta diferència estableix les variacions del model de velocitat necessàries per minimitzar-les i repetir el procés fins que la diferència entre els temps teòrics i els obtinguts sigui més petita que un cert valor, sent aquest el model final (figura 5.16).

Una vegada s'ha realitzat la inversió independent, el Rayfract exportarà les dades amb l'extensió de sortida '.GRD' per tal de poder visualitzar-lo amb el programari *Surfer*.

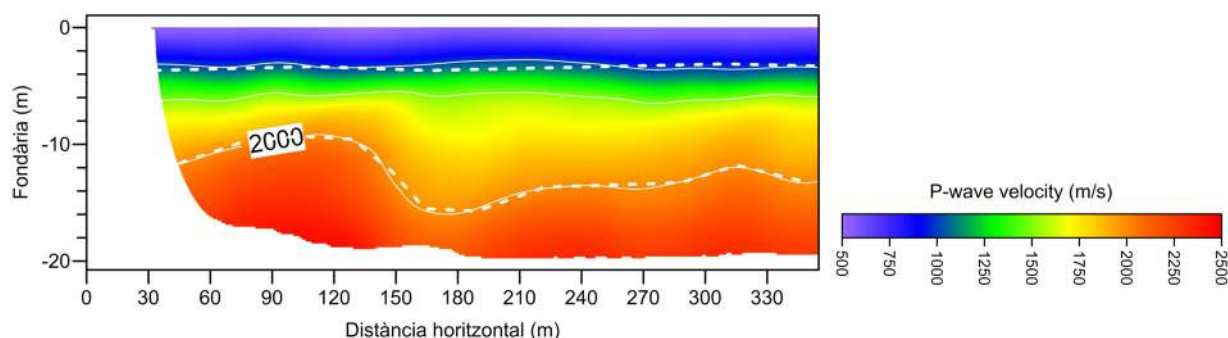


FIG. 5.16. Imatge del model final de  $V_p$  del perfil de La Granadella que resulta de la inversió independent de la tomografia sísmica de refracció fins uns 20 m de fondària.

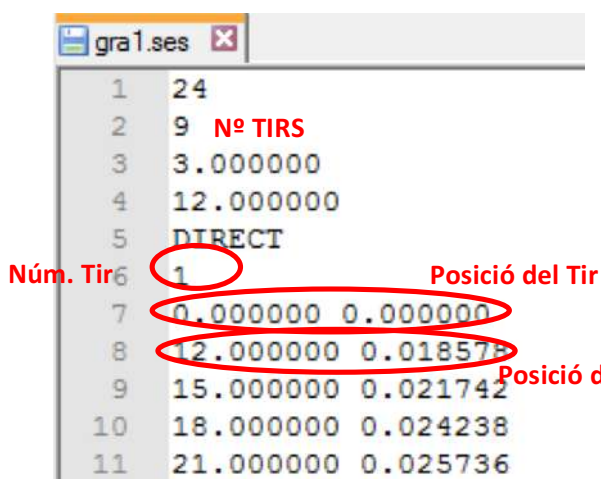
#### 5.4.3. INVERSIÓ CONJUNTA AMB EL PROGRAMARI SEISRES

Primer utilitzarem el programari de *SEISRES* que introdueix un algorisme on les rutines de resistivitat elèctrica i de refracció sísmica s'uneixen, donant un model d'inversió seqüencial. Per poder fer efectiva aquesta inversió conjunta es necessita un paràmetre en comú que serà la similitud estructural, és a dir, l'espessor de les capes del subsòl.

L'estudi amb el programari *SEISRES* es podrà realitzar gràcies a que el subsòl de La Granadella es caracteritza per uns estrats horitzontals, atribut que necessita el programari per aconseguir relacionar l'espessor de cada capa i les velocitats  $V_p$ .

Les inversions sísmiques seran la guia per la posterior inversió elèctrica, que utilitza el mètode de les pseudoseccions. Això converteix aquest programari en una inversió seqüencial i no conjunta, que és l'objectiu principal d'aquest treball. Malgrat això, aquest programari ens serveix per a començar a profunditzar en les metodologies d'inversió conjunta.

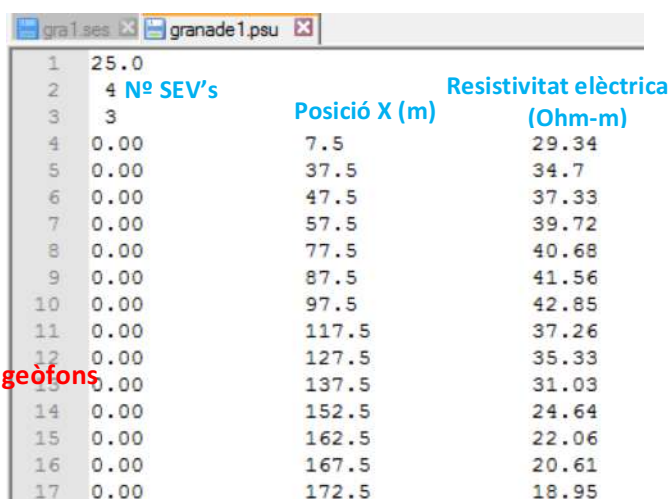
El primer pas es preparar les dades sísmiques i elèctriques amb el programari *NotePad++*, en el format que demana el *SEISRES*, que és el '.ses', un fitxer de text de dades sísmiques (figura 5.17), i el '.psu', un fitxer de text de dades elèctriques que s'extreuen de la pseudosecció mesurada al camp (figura 5.18). En el cas de la tomografia elèctrica s'ha transformat el problema 2D en problema quasi-2D, ja que la pseudosecció mesurada s'ha convertit en un perfil de varis sondejos elèctrics verticals (SEV) 1D. Això s'ha hagut de fer per restriccions del programari (no admet directament la pseudosecció 2D).



```

1 24
2 9 Nº TIRS
3 3.000000
4 12.000000
5 DIRECT
6 1
7 0.000000 0.000000
8 12.000000 0.018578
9 15.000000 0.021742
10 18.000000 0.024238
11 21.000000 0.025736
  
```

FIG 5.17. Captura de pantalla del programari *NotePad++* de les dades sísmiques. El número 24 correspon a 24 geòfons, 9 és el número de tirs, 3 és la distància entre geòfons i 12 la distància entre tirs. A la línia 7 es troba la posició del primer tir. A partir de la línia 8 apareixen dues columnes: la de l'esquerra correspon a la posició del geòfon i la segona al temps d'arribada de les ones P.



```

1 25.0
2 4 Nº SEV's
3 3 Posició X (m) Resistivitat elèctrica
4 0.00 7.5 (Ohm-m)
5 0.00 37.5
6 0.00 47.5
7 0.00 57.5
8 0.00 77.5
9 0.00 87.5
10 0.00 97.5
11 0.00 117.5
12 0.00 127.5
13 0.00 137.5
14 0.00 152.5
15 0.00 162.5
16 0.00 167.5
17 0.00 172.5
  
```

FIG 5.18. Captura de pantalla del programari *NotePad++* de les dades elèctriques. El número 25 és la distància entre sondeig elèctric vertical (SEV), 4 és el número de SEV's i 3 és l'opció al *SEISRES* per dir que utilitzem el mètode de les pseudoseccions. A partir de la línia 4 apareixen tres columnes: la de l'esquerra correspon a la posició del SEV, la del mig a la posició de  $AB/2$  i la de la dreta les resistivitats mesurades.

Un cop preparades totes les dades s'anirà al programari *SEISRES* i s'obrirà l'arxiu de dades sísmiques. Tot seguit s'haurà de prémer l'opció '*TD\_PLOT*' que dibuixarà la dromocrona, una gràfica temps-distància per cada tir, amb unes rectes que corresponen a les arribades directes i les indirectes, amb el suficient número de punts per cada tram corresponent a cada una de les interfícies refractores buscades (figura 5.19).

En aquesta gràfica es registra les primeres arribades de les ones P als receptors. La pendent d'aquestes rectes representa la inversa de la velocitat de cada medi. Aquí s'haurà de fer *clic* en els primers punts de trencament dels tirs tant el directe com l'invers.

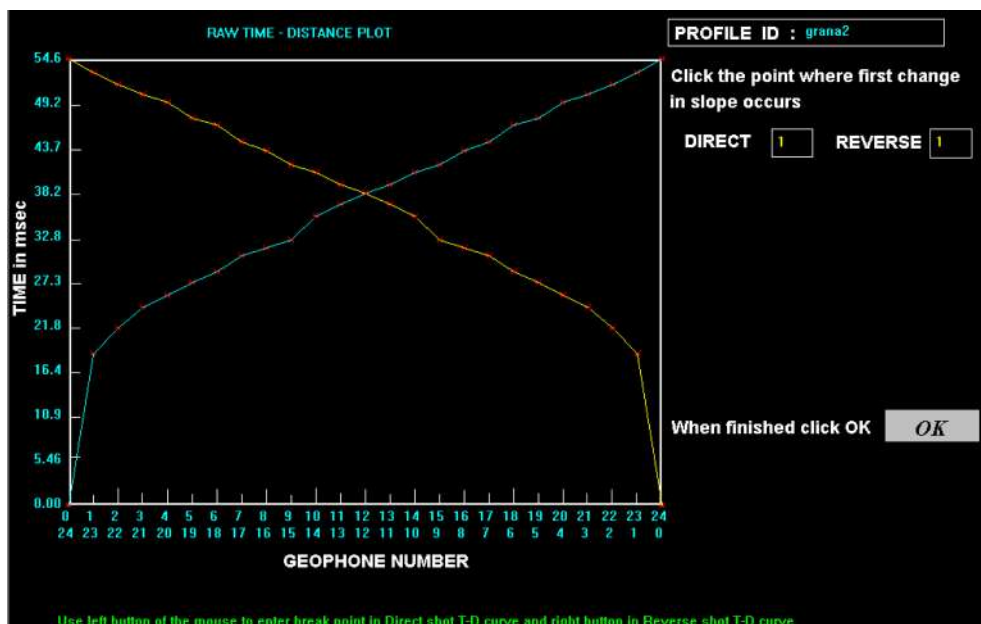


FIG. 5.19. Imatge extreta del programari SEISRES de la dromocrona generada per les dades sísmiques.

Per procedir al següent pas s'anirà a l'opció 'Xc\_PLOT' que genera un gràfic dels valors calculats per la subrutina 'Xc' anterior (distància crítica), on es farà *clic* a cada punt convenient (figura 5.20).

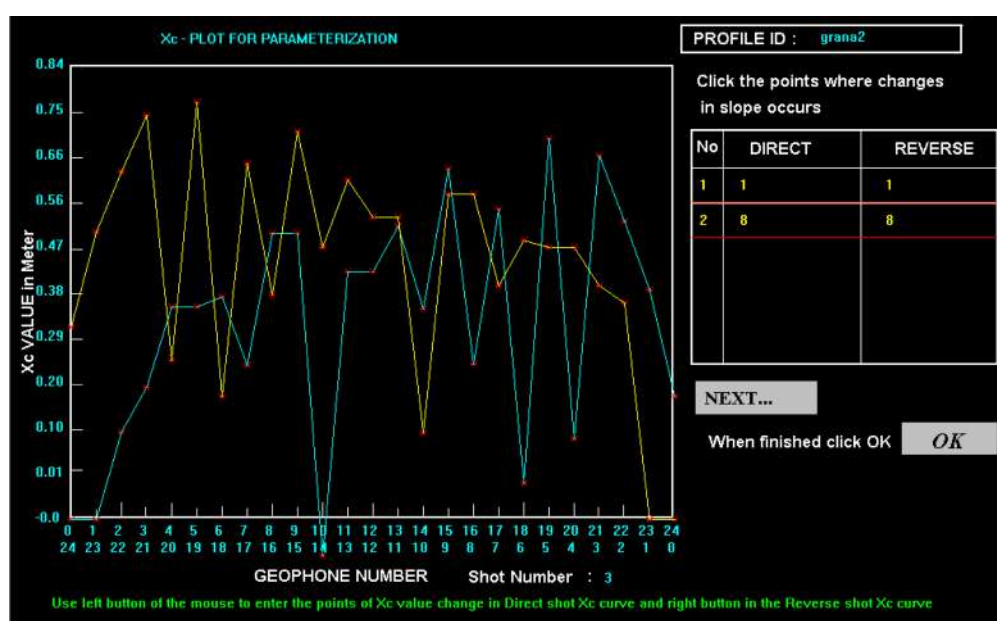


FIG.5.20. Gràfica dels valors calculats per la subrutina 'Xc' extreta del programari SEISRES.



Aquests dos passos '*TD\_PLOT*' i '*Xc\_PLOT*' es repetiran com tants tirs es tinguin.

Quan s'han realitzats tots els tirs, s'anirà a l'opció '*DEPTH\_PLOT*', on les seccions de velocitat en profunditat es visualitzen en 2D després d'interpretar el perfil sísmic per la subrutina que s'ha escollit. També exporta els paràmetres de la capa en un fitxer *.DPT* (ASCII) (figura 5.21).

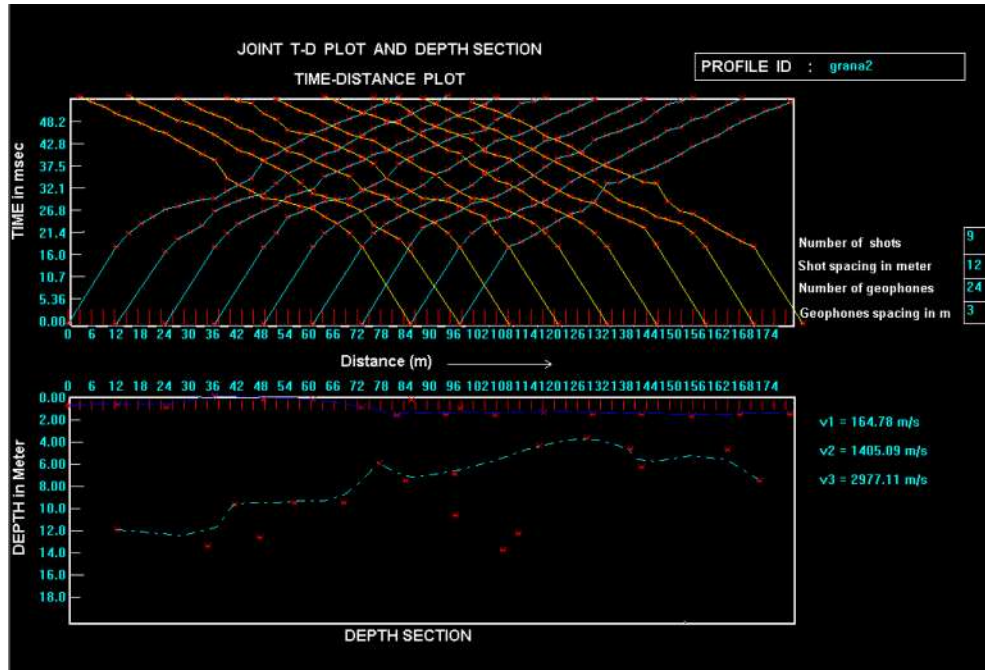


FIG. 5.21. Gràfica temps-profunditat i de les seccions de profunditat sísmiques extreta del programari SEISRES.

Finalment, per executar la inversió seqüencial s'anirà a l'opció '*curve\_dessimination*', que ens dóna varies opcions: *schlumberger*, *wenner* o *pseudo-section*, en aquest cas s'escollirà l'opció de '*pseudo-section*' ja que volem invertir part de la pseudo-secció mesurada per a un model 2D. Per això, s'obrirà un quadre de diàleg per a introduir el fitxer de dades d'elèctriques: el primer valor d'abscissa i el número de punts per a cada SEV.

Tot seguit, s'anirà a l'opció '*pseudo\_inversion*' on també s'ha d'introduir: el nom del fitxer de dades elèctriques, el número de dades i el número d'iteracions. Alhora que el programari realitza les iteracions, també representa un gràfic de les corbes de resistivitat aparent- $AB/2$  de tots els SEV's que formaran el model quasi-2D (figura 5.22).

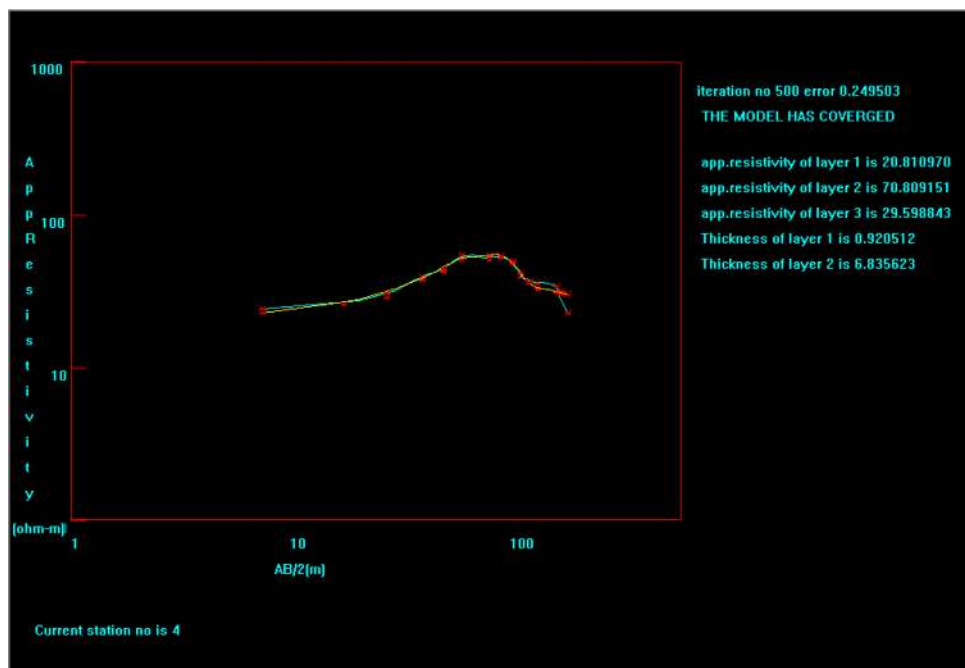


FIG.5.22. Gràfica de les corbes resistivitat aparent- AB/2 de tots els tirs extreta del programari SESIRES.

Un cop finalitzades totes les iteracions el programari presenta una gràfic en 2D de la secció geoelectrica que es genera a partir de la inversió seqüencial (figura 5.23).

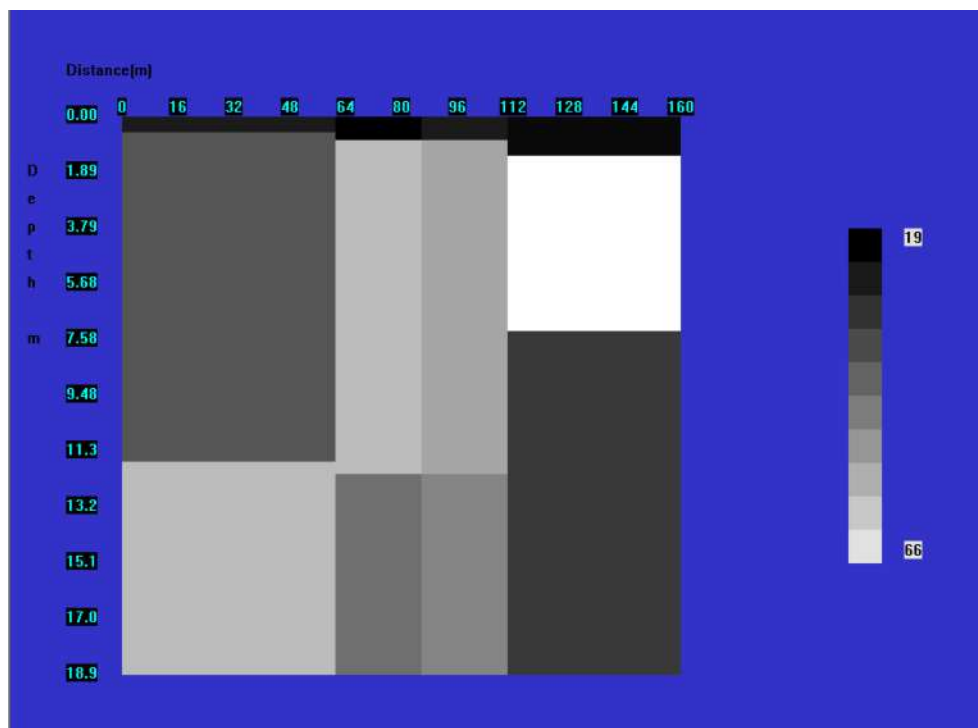


FIG. 5.23. Gràfic de la secció geoelectrica 2D amb la inversió seqüencial de pseudo-seccions extret del programari SEISRES.

Aquest model tindrà l'extensió de sortida *'CRS'* per l'elèctrica, que és un fitxer de text que ens permet crear la malla (.GRD) per tal de poder visualitzar-lo amb el programari *Surfer*, tal com es veurà a l'apartat 6 d'aquest treball. El model de sísmica només es pot guardar en forma gràfica per a veure el contacte entre els materials amb diferent velocitat.

#### 5.4.4. INVERSIÓ CONJUNTA AMB EL PROGRAMARI SUBROUTINES

Per fer la inversió simultània de les dades sísmiques i elèctriques amb el programari *SUBROUTINES* de Hamdan Ali (2012) es necessita la utilització de la mateixa malla per dur a terme l'algorisme d'inversió. Aquesta malla es crea per resoldre el problema directe de les dades d'elèctrica a partir dels elements finits, i posteriorment, s'aplica per fer el càlcul de la propagació de la traça dels raigs.

Els models que resulten de la inversió conjunta es consideren estructuralment idèntics quan el vector gradient té una direcció similar o oposada en aquells punts on existeix variació del paràmetre físic de resistivitat o velocitat sísmica. Això ens indicarà que les fronteres de contacte entre les diferents capes litològiques es trobaran localitzades en el mateix punt per ambdós models.

El primer pas és obrir el programari *Matlab* i seleccionar el *'path'* on es troba l'algorisme d'inversió i les dades d'entrada (figura 5.24). Es clicarà a *'Save'* i *'Close'*.

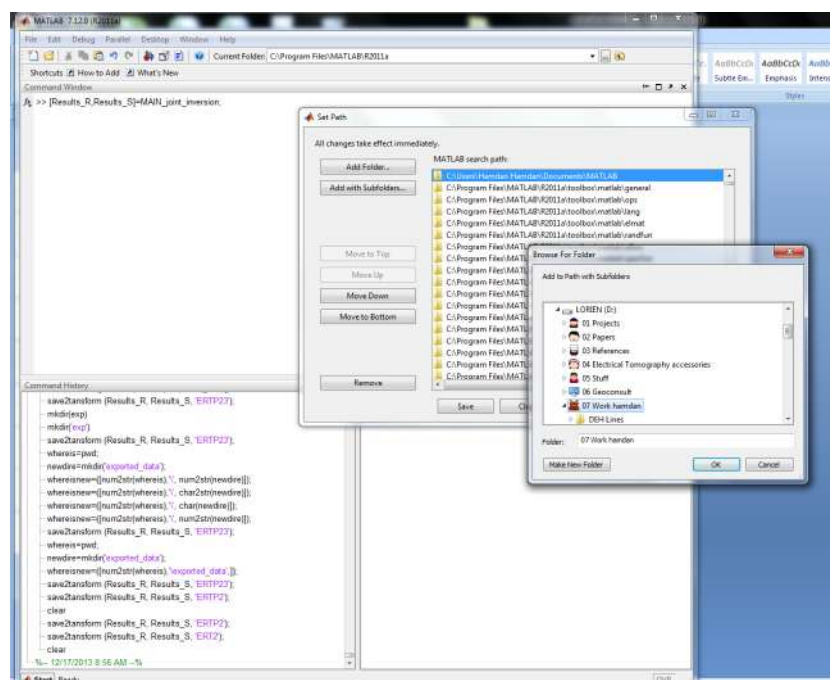


FIG. 5.24. Captura de pantalla del programari Matlab on es pot veure com s'escullen els fitxers.



El següent pas és anar a 'Current Folder', que es troba centrada a la part de dalt de la finestra del *Matlab*, aquí s'estableix el directori on es troben les dades d'entrada (figura 5.25).

ABANS

DESPRÉS

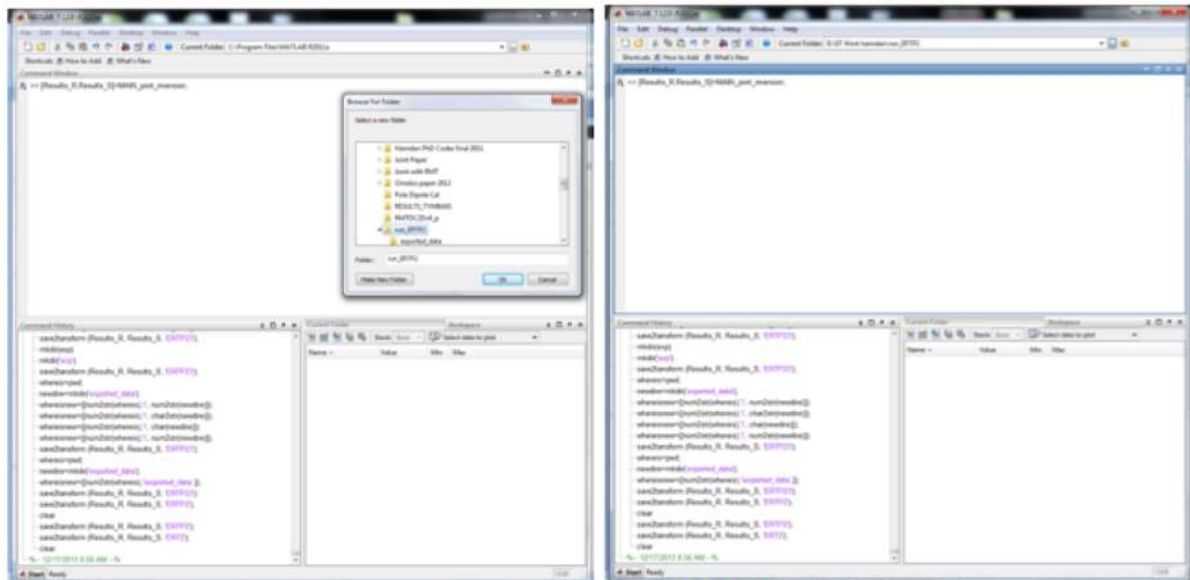


FIG. 5.25. Captura de pantalla del programari Matlab on es pot veure com estableix el directori.

A la finestra de comandament del 'Matlab' (Command Window) s'escriurà el següent comandament:

**[Results\_R,Results\_S]=MAIN\_joint\_inversion;**

On *Results\_R* és la part de l'*output* que conté tots els resultats referits a les dades elèctriques i *Results\_S* és la part de l'*output* que conté tots els resultats referits a les dades sísmiques.

Un cop s'ha clicat la tecla 'enter' apareix la següent finestra, on es demana que es seleccioni l'arxiu amb les dades elèctriques. Després apareixerà una finestra on es demana que es seleccioni el 'control\_file' que s'hagi creat anteriorment (figura 5.26), el qual conté totes les dades d'entrada necessàries per a poder incloure les dades de la sísmica en el procés de la inversió (fitxers dels temps d'arribada, posicions dels receptors i dels emissors, etc.).

```

*****
                                C O N T R O L   F I L E
*****

----- Input file to subroutine GRID.
inputfile_j100_3D.txt
----- Information about grid if you choose unevenly spaced.
xyzdata_j100_3D.txt
----- Velocity 1D model
velocity1d_j100_3D.txt
----- Velocity 3D model.
velocity3d_j100_3D.txt
----- Sources coordinates. (x. y. z.)
source_j100_3D.txt
----- Receivers coordinates. (x. y. z.)
receiver_j100_3D.txt
----- File with Sid(integ.), Rid(integ.), travelttime(real).
real_time_j100_3D.txt
----- Values of variables :beta1, beta2, nint, fto1, dr.
defbend_j100_3D.txt
----- Condition number variable
1.e-4
----- Error (sd)
0.2

CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC

```

FIG. 5.26. Imatge de l'arxiu 'control\_file' que indica totes les dades d'entrada de les dades sísmiques.

Finalment, apareixeran les finestres d'entrada de paràmetres per fer la inversió conjunta. A la figura 5.27 es mostren les finestres amb paràmetres indicatius.

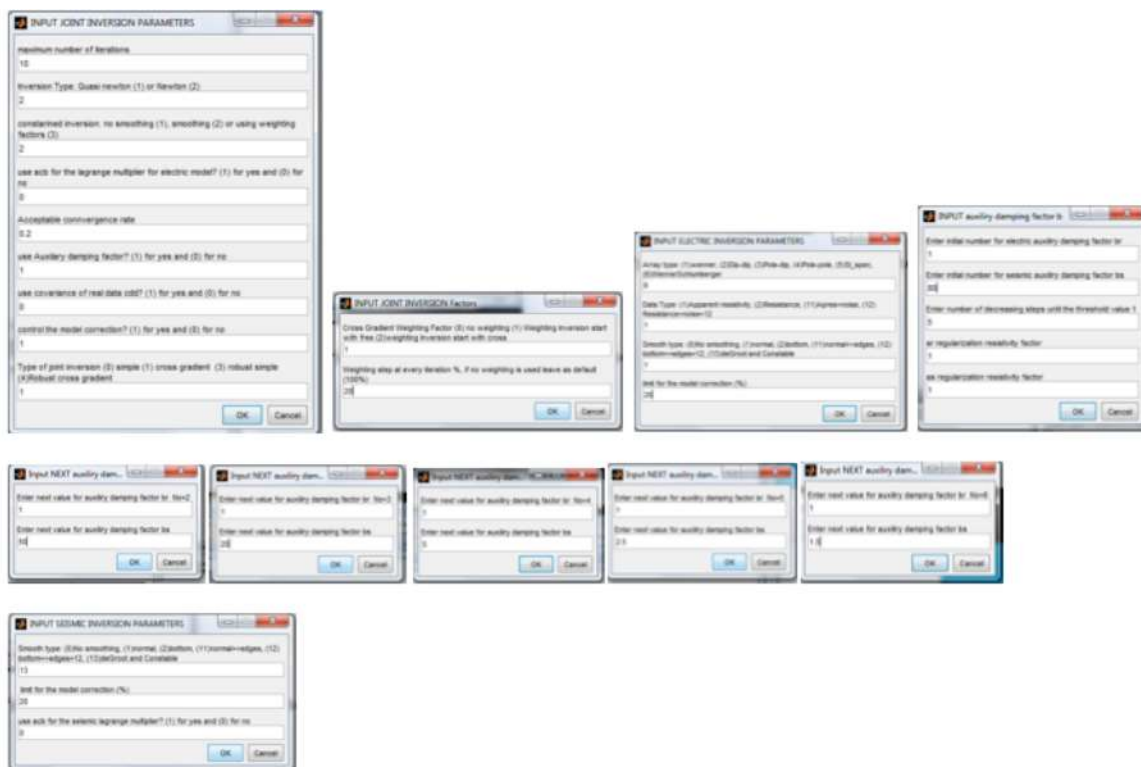


FIG. 5.27. Imatge de les finestres d'entrada dels paràmetres.

D'aquest algorisme d'inversió, existeix un paràmetre important que s'anomena '*damping factor*'. En aquest cas es defineix un *damping factor* pel model elèctric ( $\beta_r$ ) i un pel model sísmic ( $\beta_s$ ). Aquest factor auxiliar permet jugar amb la importància de les dades en el procés de la inversió de manera que una dada pot tenir un pes superior si se sap que la seva qualitat és superior.

En aquest estudi s'ha escollit una inversió tipus '*Newton*', amb 7 iteracions, una inversió restringida tipus '*smoothing*', uns *damping factors* iguals per a cada model, tant l'elèctric com en el sísmic, la configuració elèctrica dipol-dipol, i l'opció de inversió conjunta.

Després de clicar OK a l'última finestra d'entrada de paràmetres apareixeran les tres figures següents (figura 5.28):

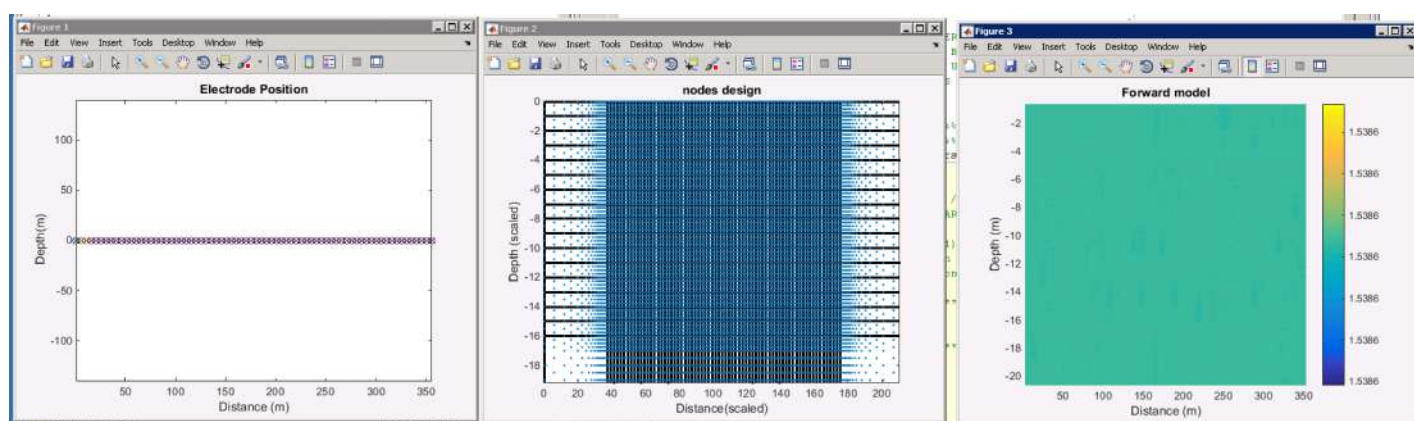


FIG. 5.28. La primera imatge començant per l'esquerra descriu la posició dels elèctrodes, la segona imatge la malla dels nodes i l'última imatge és el model inicial per a les dades d'elèctrica.

Després de que s'hagin creat les anteriors figures el programa ens demanarà el número de capes sísmiques per a crear el model inicial de la sísmica (figura 5.29).

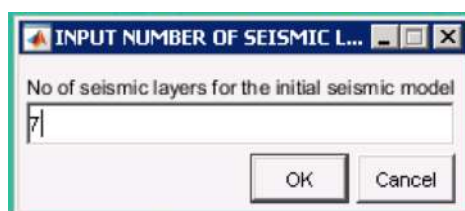


FIG.5.29. Finestra que descriu el número de capes pel model inicial de les dades sísmiques.

Després de prémer OK ens demanarà la velocitat i el gruix de les capes, el gruix de l'última capa es considera que arriba fins a la màxima profunditat del model (figura 5.30).

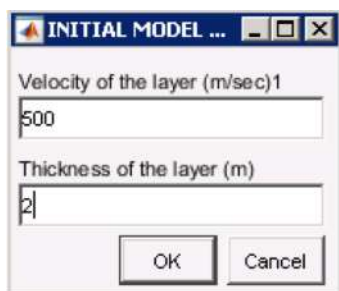


FIG. 5.30. Finestra d'input de la velocitat de cada capa i del seu gruix.

Després apareixeran les següents figures que descriuen el disseny de la malla i del model inicial per a les dades de sísmica (figura 5.31)

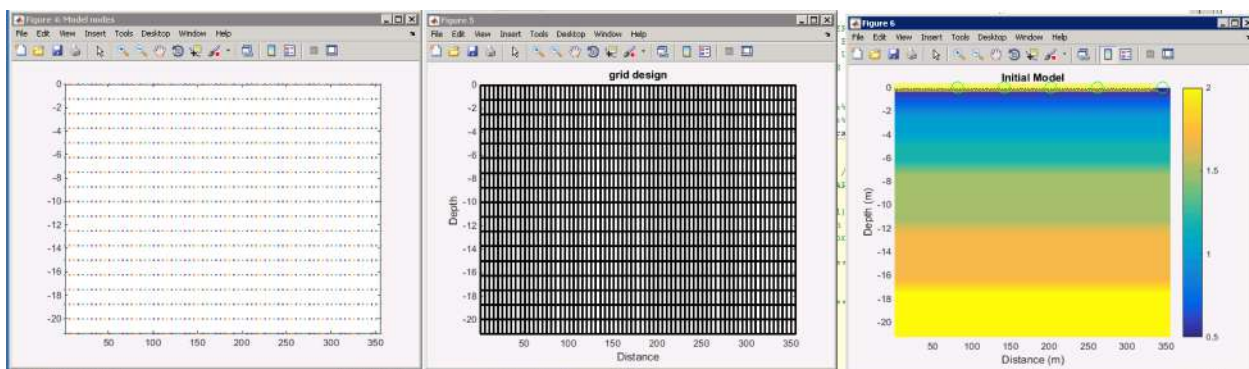


FIG. 5.31. Les figures ens mostren la generació de la malla i del model inicial per a les dades de sísmica.

Al cap d'una estona apareixeran les dues finestres següents, que mostraran que el procés de la inversió conjunta ja ha començat (figura 5.32).



FIG. 5.32. Les figures ens mostren que el procés de la inversió conjunta ja ha començat.

Quan ja s'hagi completat la inversió conjunta, al '*workspace*' trobarem dos *arrays* (*Results\_R* i *Results\_S*). Es guardaran com un arxiu *.mat* per poder veure els resultats posteriorment.

També, a la carpeta que havíem establert com *Current Folder* al principi, es guardaran automàticament dos arxius *.txt* (*Final\_results.txt* i *Line\_Info.txt*) on estaran els models elèctrics i sísmics de l'última iteració i més informació dels paràmetres utilitzats en la inversió conjunta.

## 6. ANÀLISI I INTERPRETACIÓ DE RESULTATS

En aquest apartat es mostraran els models finals del perfil de La Granadella obtinguts a partir de la inversió independent de les dades elèctriques i sísmiques, i el resultat de la inversió conjunta d'ambdós mètodes per observar si aquesta aporta una visió més completa i única del subsòl de manera que ajuda a una interpretació geològica final més adient.

### 6.1. RESULTATS AMB LA INVERSIÓ INDEPENDENT

La secció de resistivitat elèctrica que resulta de la inversió independent d'aquestes dades indica que el subsòl està format per dos capes ben diferenciades. La primera capa amb una resistivitat mitja de 25 Ohm·m es localitza entre uns 12-18 m de gruix, aproximadament. La segona capa és més resistiva augmentant fins els 150 Ohm·m i arriba fins a la màxima fondària que presenta el model, 20 metres. Aquesta capa no es mostra contínua en tot el perfil ja que al SO del model la part resistiva desapareix per a tornar a mostrar-se en la part final del model (figura 6.1).

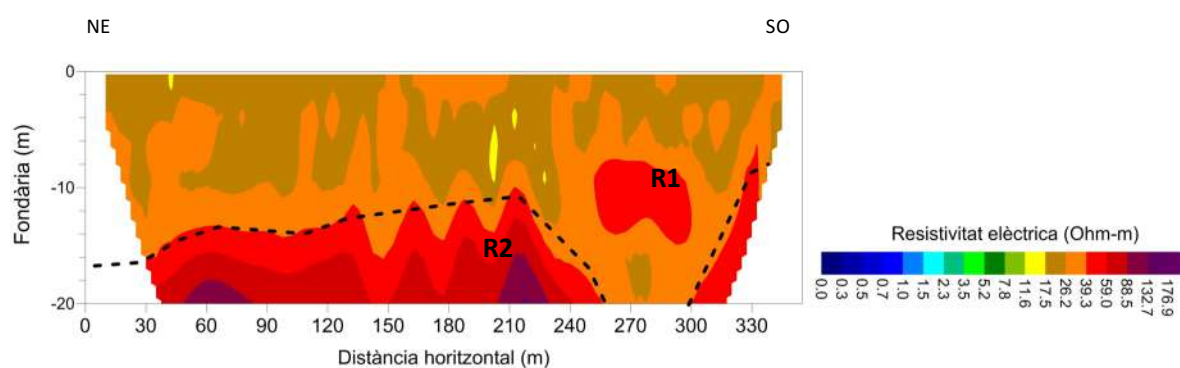


FIG. 6.1. Imatge extreta del software Surfer del model independent final de la resistivitat elèctrica del perfil de La Granadella fins a 20 m de fondària. En línia negra discontinua marca el contacte entre dos resistivitats ben diferenciades (R1 i R2).

La secció de velocitat d'ones P determinada a partir de la inversió independent suggereix la presència de tres capes fins els 20 m de fondària que augmenten de velocitat de manera gradual des dels 500 m/s fins els 2500 m/s. A aquesta profunditat el model mostra una primera capa molt poc compactada amb velocitat de les ones P baixa que oscil·la dels 500 m/s



als 1000 m/s i arriba als 5 m de fondària. Per sota, la velocitat augmenta fins els 2000/s entre els 10 m i els 16 m de fondària i, finalment, es detecta el material més compactat amb una velocitat elevada de 2500 m/s fins els 20 m (figura 6.2).

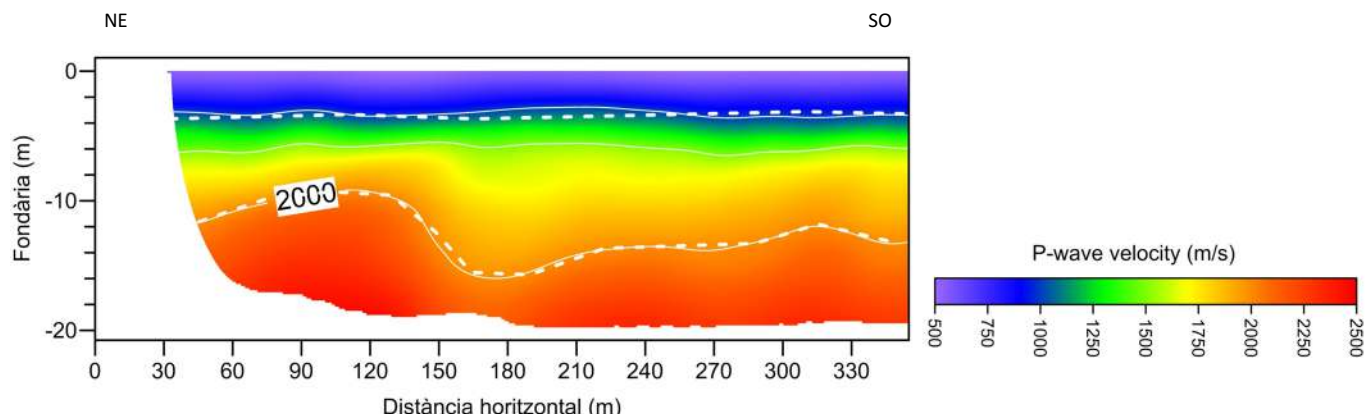


FIG. 6.2. Imatge extreta del software Surfer on el pot observar el model independent de velocitats final d'ones P del perfil de La Granadella fins a 20 m de fondària. Les línies discontinúes blanques indiquen els canvis importants de velocitat.

A partir dels models que resulten de les inversions independents anteriors es pot observar que cada model aporta diferents gruixos de les capes litològiques i també diferent nombre de capes. Així, es pot observar molt bé la discrepància en tot el model (figura 6.3). Per fer aquesta comparació s'ha reduït el model de tomografia elèctrica a un gruix de 20 m, per a que la fondària d'investigació de la tomografia elèctrica i la sísmica de refracció sigui del mateix ordre i també s'ha acotat la llargada del perfil a 355 m.

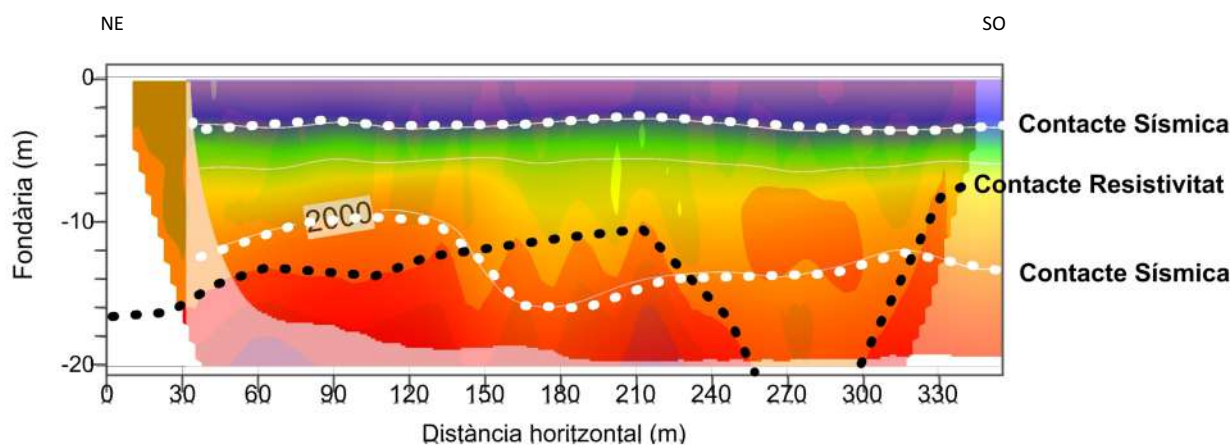


FIG. 6.3. Superposició dels dos models individuals que mostra les discrepàncies en els contactes que detecta cada tècnica geofísica. Les línies blanques marquen les capes del model sísmic i la línia negra marca el contacte detectat amb la tomografia elèctrica.

Un cop observats els paràmetres geofísics mesurats que resulten del models independents finals es pot correlacionar tota la informació, la qual es descriu en aquesta taula (taula 6.1):

VALORS DE RESISTIVITAT (Ohm·m)	VALORS DE VELOCITAT D'ONES P (m/s)	LITOLOGIA
$18 < \rho < 40$	$500 < V_p < 1000$	Dipòsits lacustres amb molta material orgànica, argiles i llims
	$1000 < V_p < 2000$	Argiles i llims més compactats
$40 < \rho < 150$	$V_p < 2500$	Graves, pot incloure localment sediments fins

TAULA 6.1. Determinació de la litologia segons els valors de resistivitat elèctrica i de velocitat  $V_p$  obtinguts.

En primer lloc, es troba una capa de sediments lacustres de l'Holocè que poden ser interpretats com una alternança d'argiles i llims amb molta matèria orgànica, la qual presenta valors de resistivitat elèctrica i  $V_p$  baixos, com és d'esperar, ja que es tracta d'un material porós amb possible contingut d'aigua en els seus porus, la qual cosa provoca un augment de conductivitat i amb una  $V_p$  baixa perquè els sediments estan molt poc compactats.

En segon terme, mentre que el model sísmic mostra un augment de la  $V_p$  de manera que es preveu una compacitat dels materials major que en la capa superior, el model elèctric no diferencia una unitat litològica amb un comportament resistiu diferent de la capa superior. Semblaria que el comportament químic del material no difereix gaire del superior i per aquest motiu, la resistivitat elèctrica es troba dins del mateix rang de valors (18–40 Ohm·m). Seria una capa d'argiles i llims de l'Holocè més compacta.

Per últim, es troba la capa de graves del Plistocè superior, la qual pot incloure localment sediments fins lacustres. Aquesta unitat presenta un augment significatiu dels valors de resistivitat elèctrica i també de la  $V_p$ , això es degut a que aquest material és més compacte. Que el valor de  $V_p$  sigui més alt que en la primera capa, es degut a que la velocitat



normalment augmenta en profunditat, és per aquest motiu que necessitem de resistivitat elèctrica per poder interpretar millor la litologia del terreny.

Malgrat poder fer una correlació dels dos mètodes, les capes que detecta la sísmica no són iguals que les que detecta la tomografia elèctrica fins a la fondària de 20 m, com es pot veure en les figures anteriors. Les dades de sísmica de refracció obtenen tres capes amb velocitats diferenciades. La primera capa presenta uns valors baixos de  $V_p$  entre 500 i 1000 m/s. El gruix d'aquesta capa és de 5 m. Per sota, hi ha la segona capa on es descriu una zona de transició on hi ha un augment de la  $V_p$ , passant dels 1000 als 2000 m/s. Finalment, l'última capa es localitza a una fondària variable entre els 10 i els 15 m i presenta una velocitat superior als 2000 m/s, indicant que a aquesta fondària apareix un material molt competent.

D'altra banda, les dades mesurades per la tomografia elèctrica detecten un material molt heterogeni en els 15 primers metres. El canvi de resistivitat és en el contacte entre dos materials resistius R1 (18-40 Ohm·m) i R2 (40-150 Ohm·m) a una fondària entre 15 i 20 m.

Quan es comparen els dos models es veu la discrepància en la detecció de les capes entre ambdós mètodes, que es troba al voltant del 8 metres aproximadament. El número de capes detectades en cada mètode no coincideix, ni tampoc l'última capa de la sísmica s'acaba ajustant al contacte R1 i R2 del model elèctric.

Per això es vol treballar amb la inversió conjunta d'ambdós mètodes geofísics per reduir aquesta discrepància. Aquesta forma de treball suposa una millora en la interpretació de l'estructura litològica de la zona d'estudi indicant la fondària a la que es troben els contactes o les fronteres entre les diferents litologies (figura 6.3).

## **6.2. RESULTATS AMB LA INVERSIÓ CONJUNTA**

### **6.2.1. INVERSIÓ CONJUNTA AMB SEISRES**

L'essència d'aquest programa és invertir les dades i trobar un model del subsòl amb un nombre concret de capes i un gruix determinat per a elles. Aquest model servirà de guia per a la inversió de les dades d'elèctrica, per això diem que és un procés seqüencial.

Per a realitzar la inversió seqüencial de les dades elèctriques i sísmiques amb aquest programari, s'ha hagut de reduir en el fitxer d'entrada el número de dades, és a dir, acotar a 150 metres la distància horitzontal i a 20 metres la profunditat, ja que al realitzar una sèrie de proves es va observar que si tenim un nombre elevat de dades, la inversió presenta alguns errors en les dades calculades (divergència en els models finals de les dades sísmiques). Així els models sísmic i elèctric han quedat dividits en dos models consecutius.

Les seccions de resistivitat elèctrica i de velocitat sísmica que resulten de la inversió seqüencial del perfil de La Granadella es presenten a continuació.

La secció de velocitat d'ones P determinada a partir de la inversió seqüencial té 20 m de fondària i presenta tres capes que augmenten de velocitat de manera gradual des dels 165 m/s fins els 3500 m/s. El model mostra una primera capa molt poc compactada de 2 m de fondària i amb una velocitat de les ones P baixa d'uns 165 m/s aproximadament. Per sota, la velocitat augmenta fins els 1500 m/s entre els 8 i els 12 m de fondària i, finalment, es detecta el material més compactat amb una velocitat elevada que oscil·la dels 3000 m/s als 3300 m/s fins els 20 m (figura 6.4). Totes les capes presenten fronteres variables en fondària de manera que l'estratificació de les capes és relativa, indicant un comportament del terreny 2D. L'arxiu ascii de sortida del model final sísmic no es pot passar a *Surfer* perquè el programa considera que el model és 1D i no ens permet observar la variació lateral i vertical dels contactes de les capes. Per això es mostra només la sortida gràfica del model sísmic.

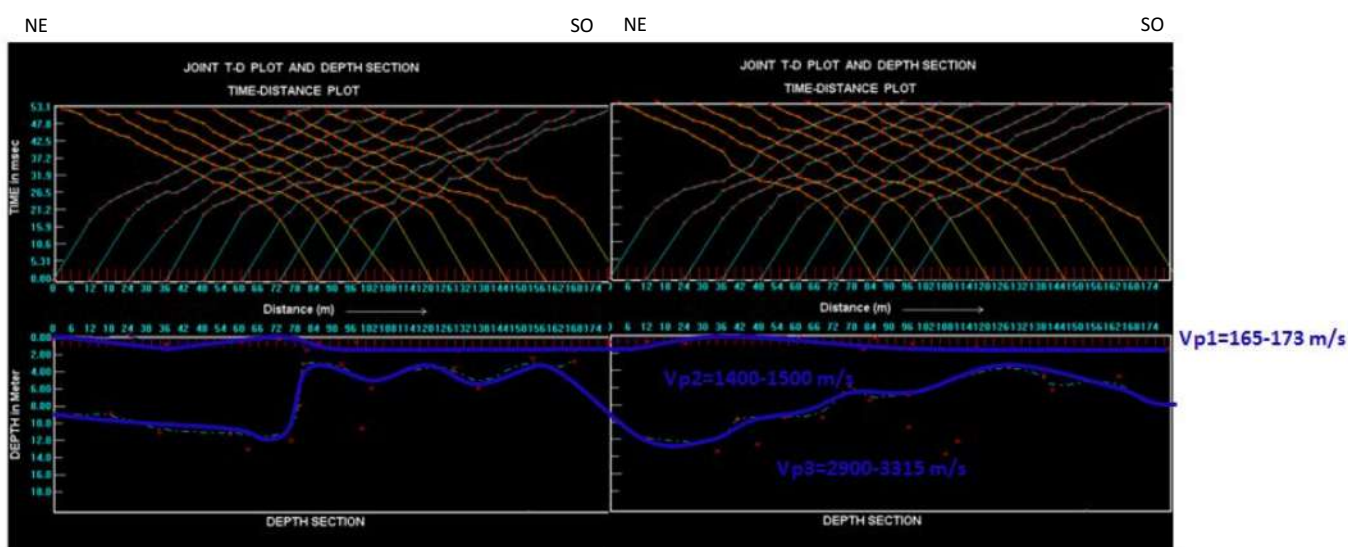


FIG.6.4 . Imatge extreta del programari SESIRES que mostra les capes a diferents profunditats amb les seves velocitats sísmiques.

En la secció de resistivitat elèctrica, que resulta de la inversió seqüencial, la primera capa té una resistivitat que oscil·la entre els 18 i 30 Ohm·m arribant a uns 2 m de fondària. La segona capa és més resistiva i augmenta fins els 65 Ohm·m, amb un gruix de 8 m com a màxim. Finalment, la tercera capa és conductiva i torna a oscil·lar entre els 18 i 30 Ohm·m. La fondària d'investigació d'aquestes dades esta acotada a 14 metres de fondària (figura 6.5). Les dades obtingudes poden ser presentades gràficament amb el programa *Surfer* i aplicar una interpolació adient per a veure la transició de valors de resistivitat elèctrica d'una manera més suavitzada (figura 6.6).

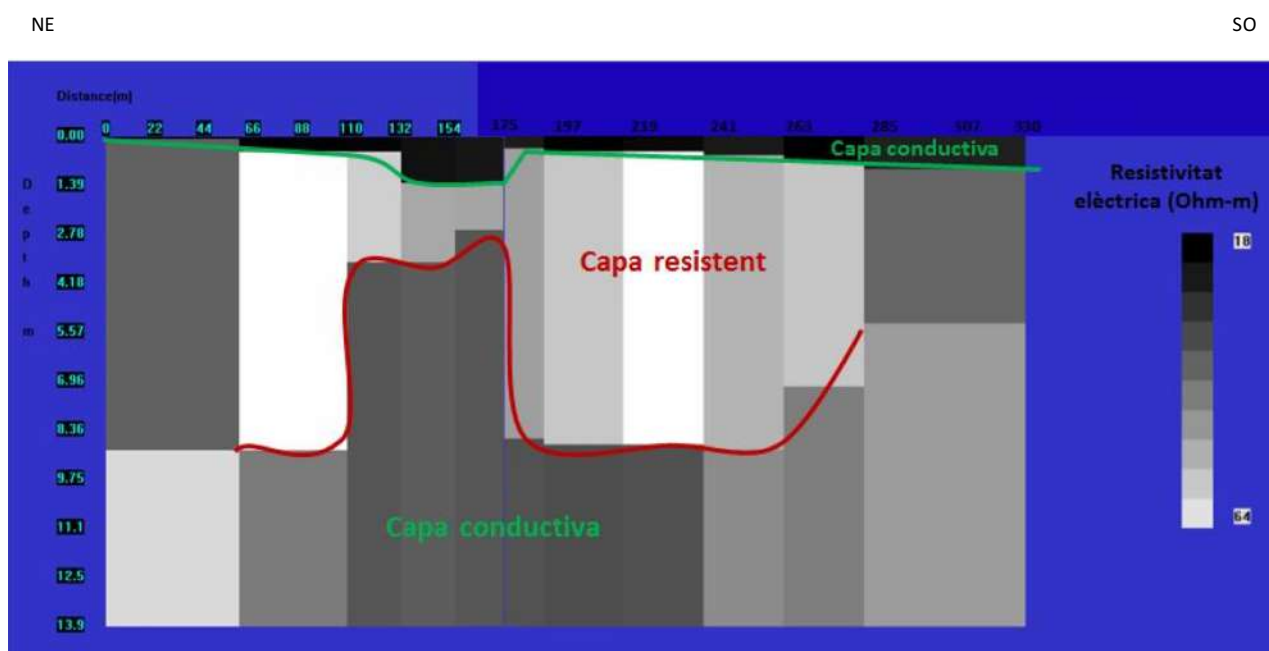


FIG. 6.5. Imatge extreta del programari SEISRES que mostra el model de resistivitat elèctrica tenint en compte les diferents capes que sorgeixen de les dades sísmiques.

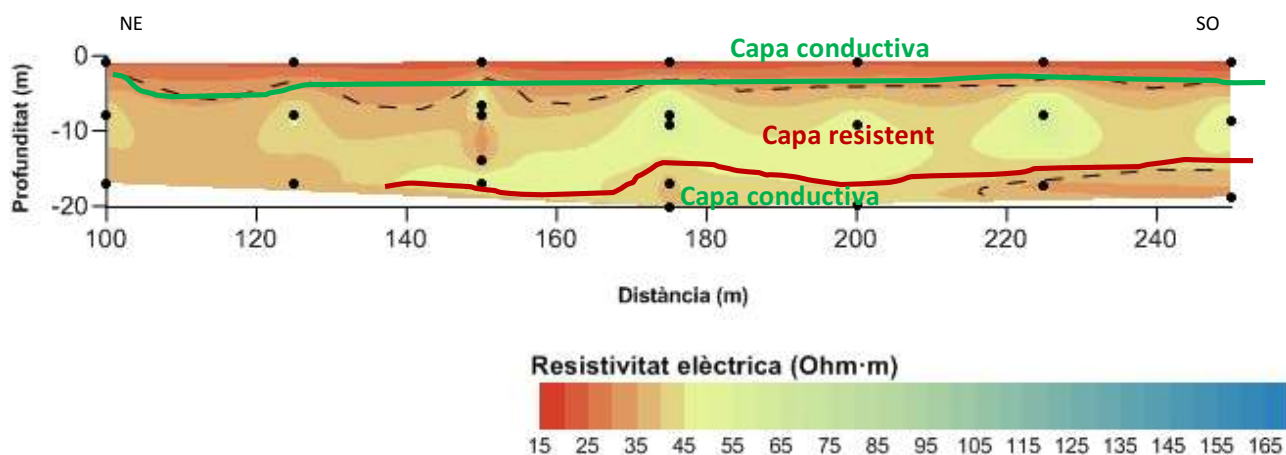


FIG. 6.6. Imatge extreta del programari Surfer que mostra la secció de resistivitat elèctrica tenint en compte les diferents capes que sorgeixen de les dades sísmiques.

Un cop obtinguts els models que resulten de la inversió *SEISRES* i amb l'ajuda de la informació geològica que es coneix de la zona, s'analitzen les dades. El primer que s'observa és que semblaria que el model d'elèctrica només aconsegueix ajustar les dades observades i les calculades fins als 14 m de fondària.

Si es comparen els dos models (sísmic i elèctric) de les figures 6.4 i 6.5, es pot observar com les fronteres són bastants coincidents entre elles de manera que la primera capa conductiva coincideix amb la capa més superficial de baixa velocitat (Vp1, contacte 1) amb un gruix molt reduït de 2 metres, seguidament apareix una capa resistent amb velocitat superior propera als 1500 m/s amb un gruix variable (contacte 2). La forma d'aquesta frontera és similar en els dos models. Finalment, la capa conductiva més profunda semblaria que s'associa amb una capa de velocitat elevada (3000 m/s). La interpretació d'aquesta darrera capa és complexa ja que per velocitat podria associar-se a un material com la grava, però el resultat del comportament elèctric (conductiu) seria incoherent ja que la grava hauria d'aportar un valor més resistiu. Així ho indica la inversió individual de la tomografia elèctrica. Així doncs, creiem que la inversió de les dades elèctriques està molt condicionada pel model sísmic i per tant, el resultat no seria coherent amb la informació geològica malgrat la bona correlació de les fronteres d'ambdós models (figura 6.7).

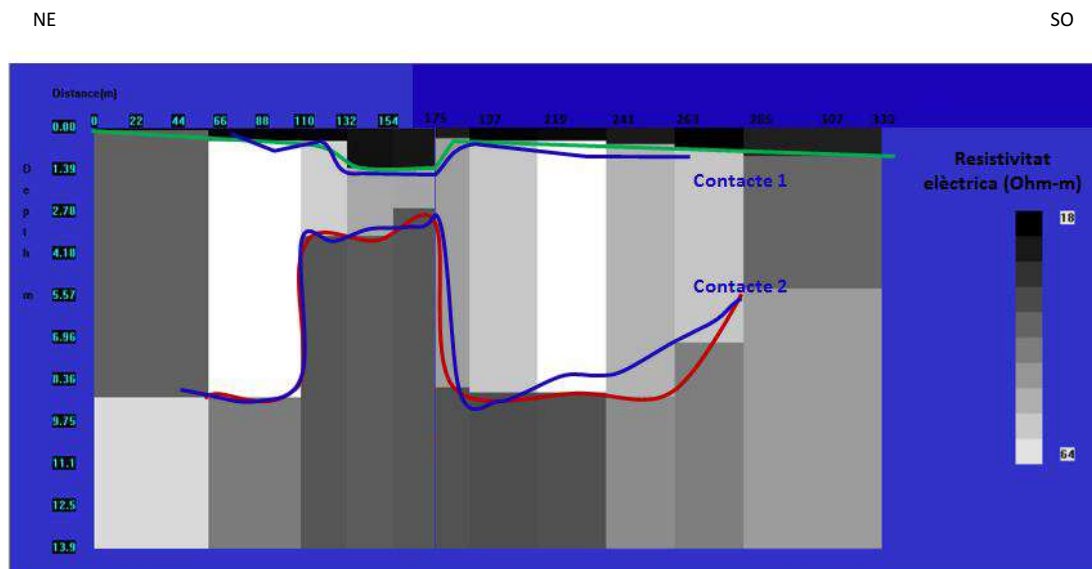


FIG. 6.7. Imatge extreta del programari *SEISRES* que mostra el model de resistivitat elèctrica tenint en compte les diferents capes que sorgeixen de les dades sísmiques.

VALORS DE RESISTIVITAT ELÈCTRICA (Ohm·m)	VALORS DE VELOCITAT D'ONES P (m/s)	LITOLOGIA
$18 < \rho < 25$	$164.78 < V_p < 173.25$	Dipòsits lacustres (Argiles i llims)
$35 < \rho < 64$	$173.25 < V_p < 1447.54$	Intercalació de sorres
$25 < \rho < 35$	$1447.54 < V_p < 3314.52$	Material fi, argila i llims/ Grava amb sediments fins

TAULA 6.2. Determinació de la litologia segons els valors de resistivitat elèctrica i de velocitat  $V_p$  obtinguts. El darrer requadre presenta incoherència en la interpretació dels dos mètodes.

Si comparem els resultats del model seqüencial amb el model independent veiem que en la sísmica de refracció es detecten les tres capes però aquestes no es troben a la mateixa fondària ja que en la inversió del SEISRES el valor de la capa de  $V_p$  elevada es troba molt més superficial. La forma del contacte però sí que sembla similar (Figura 6.8).

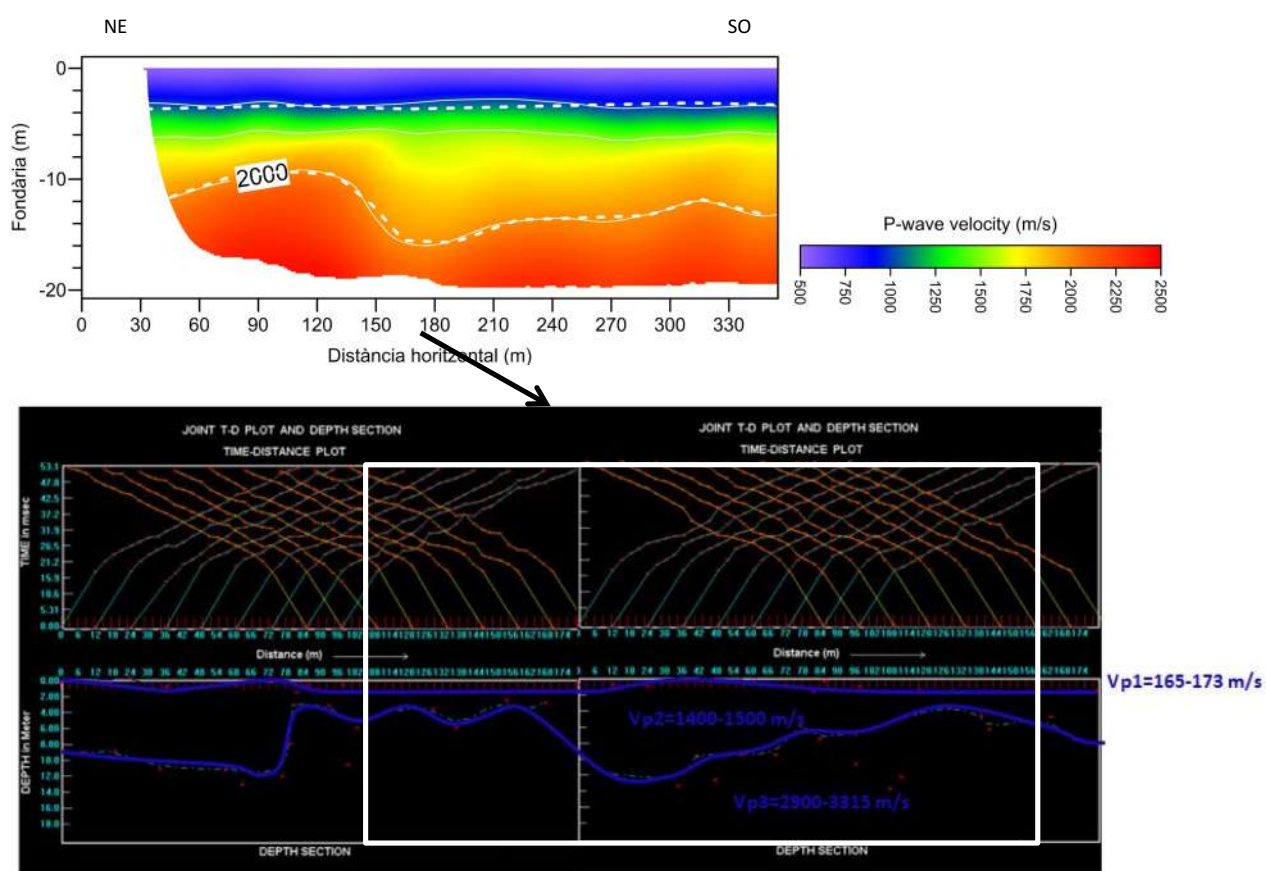


FIG. 6.8. Imatge que compara les dues seccions de velocitats sísmiques del perfil de la Granadella que resulten de la inversió individual (a dalt) i de la inversió seqüencial amb SEISRES (a baix).

Pel que fa a la tomografia elèctrica, els models són molt diferents ja que no coincideixen ni amb el número de capes. Això és degut a que el pes del model inicial de la tomografia sísmica que utilitza el programari *SEISRES* és molt elevat, i per tant el resultat del model elèctric té els 'constraints' que li imposa la sísmica (figura 6.9).

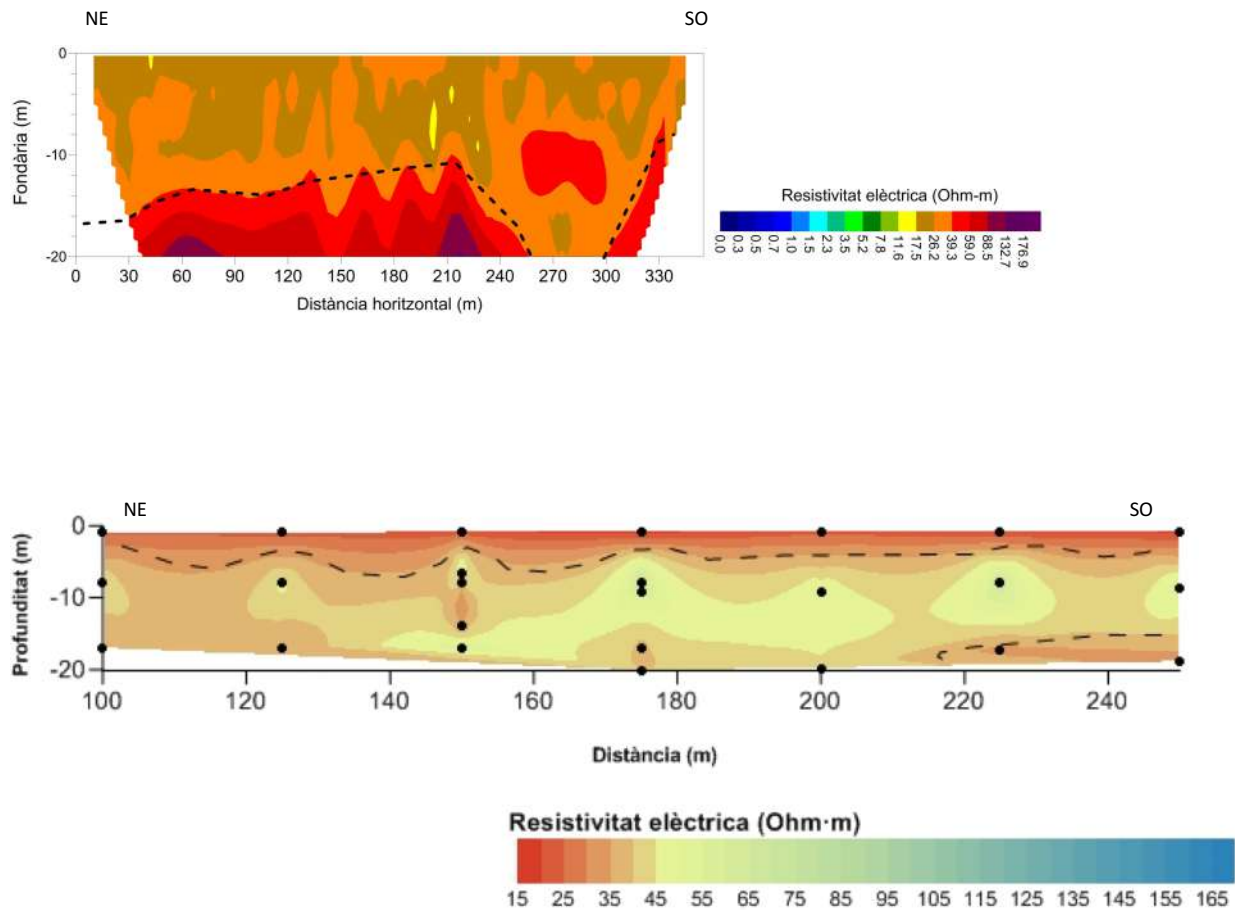


FIG. 6.9. Imatge que compara les dues seccions de resistivitat elèctrica del perfil de la Granadella que resulten de la inversió individual (a dalt) i de la inversió conjunta (a baix).

Com a conclusió podem dir doncs que aquesta inversió seqüencial no és del tot satisfactòria ja que encara que les fronteres entre els models elèctrics i sísmic tenen una bona correlació entre elles, la interpretació segons la geologia de la zona i la comparació amb els models individuals no és coherent.



### 6.2.2. INVERSIÓ CONJUNTA AMB SUBROUTINES

L'essència d'aquest programa es basa en l'algorisme de gradients creuats per a dur a terme la inversió conjunta de les dades elèctriques i sísmiques. Aquest procés utilitza un factor de ponderació anomenat "*damping factor*" que serveix per a donar més o menys importància a les dades geofísiques. Aquest paràmetre és molt important en la inversió i pot variar molt el model final que es deriva. Com l'anterior programari *SEISRES*, s'ha identificat la geometria de les diferents capes com a paràmetre en comú que tenen les dades sísmiques i elèctriques. La idea bàsica d'aquest algorisme és una estimació quantitativa de les similituds estructurals entre els models de la resistivitat elèctrica i la velocitat sísmica. Per a fer això, s'utilitza el producte creuat dels seus gradients i aconseguir un model geològic unificat que pot satisfer ambdós grups de dades.

Les dades elèctriques i sísmiques també han estat acotades a 20 m de fondària per disminuir el temps d'inversió. Les seccions de resistivitat elèctrica i de velocitat sísmica que resulten de la inversió conjunta de les dades del perfil de La Granadella indiquen que el subsòl està format per tres capes ben diferenciades. En la secció de resistivitat elèctrica, que resulta de la inversió conjunta, la primera capa té una resistivitat elèctrica propera als 15 Ohm·m arribant a uns 2 m de fondària. La segona capa és més resistiva i augmenta fins els 50 Ohm·m, amb un gruix de 10 m aproximadament. Finalment, la tercera capa és més resistiva i oscil·la entre els 50 i els 88 Ohm·m. La fondària d'investigació d'aquestes dades està acotada a 20 metres (figura 6.10).

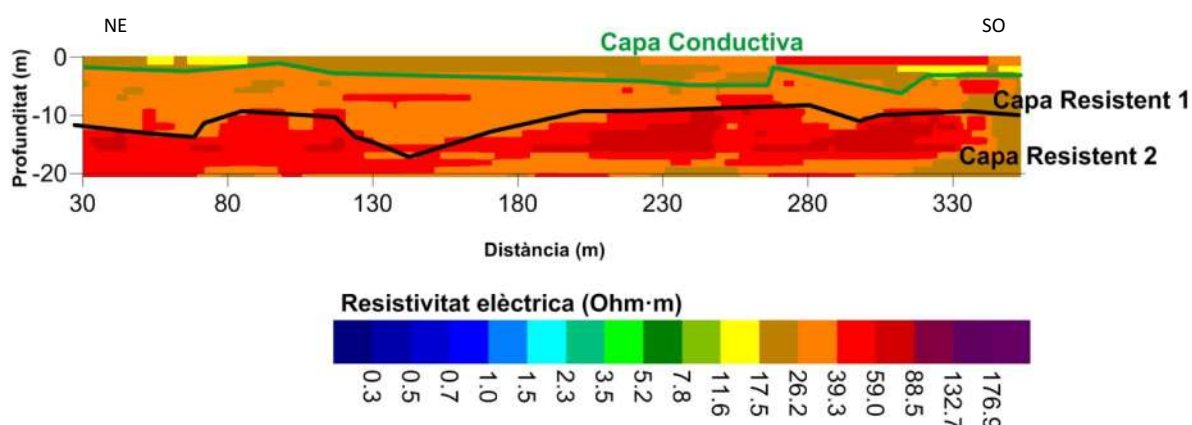


FIG. 6.10. Imatge extreta del programari Surfer que mostra el model de la resistivitat elèctrica de la Granadella que resulta de la inversió conjunta amb el programari Subroutines.

La secció de velocitat d'ones P determinada a partir de la inversió conjunta té 20 m de fondària i les tres capes augmenten de velocitat de manera gradual des dels 400 m/s fins els 5000 m/s. El model mostra una primera capa de 2 m de fondària aproximadament i molt poc compactada amb una velocitat de les ones P baixa que oscil·la dels 500 m/s als 1000 . Per sota, la velocitat augmenta fins els 2000 m/s fins els 10 m de fondària aproximadament. Finalment, es detecta el material més compactat amb una velocitat elevada de 5000 m/s fins els 20 m (figura 6.11).

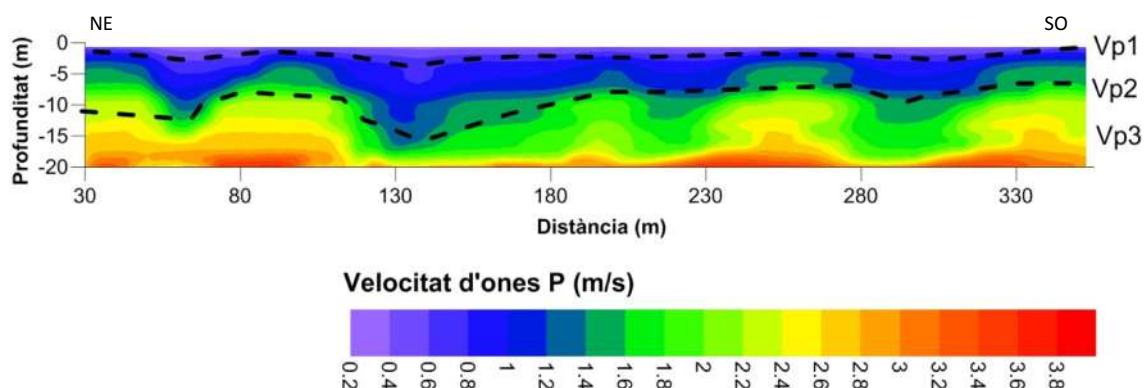


FIG. 6.11. Imatge extreta del programari Surfer que mostra el model de velocitat sísmica del perfil de la Granadella que resulta de la inversió conjunta amb el programari SUBROUTINES.

Un cop obtingut el model conjunt, i amb l'ajuda de la informació geològica de la zona i dels models independents, passem a analitzar les dades (taula 6.3).

VALORS DE RESISTIVITAT (Ohm·m)	VALORS DE VELOCITAT D'ONES P (m/s)	LITOLOGIA
$15 < \rho < 25$	$500 < V_p < 1000$	Dipòsits lacustres (Argiles i llims)
$25 < \rho < 40$	$1000 < V_p < 2000$	Intercalació de sorres
$40 < \rho < 65$	$2000 < V_p < 5000$	Grava amb sediments fins

TAULA 6.3. Determinació de la litologia segons els valors de resistivitat elèctrica i de velocitat  $V_p$  obtinguts.

Si comparem ambdós models, les fronteres entre les diferents capes que detecta la tomografia elèctrica són iguals que les fronteres que detecta la sísmica de refracció fins a la fondària de 20 metres. Són en aquest sentit molt coherents entre ells (figura 6.12) i mostren en els dos casos



tres capes ben diferenciades. Una primera capa molt fina de 2 metres, una segona capa entre els 2 metres i els 12 metres i, finalment, una tercera capa que arriba fins a la màxima fondària detectada per les dades invertides. Com es pot observar en la figura 6.12 malgrat hi ha zones on les fronteres són una mica més diferents, en general el resultat indicaria un mateix comportament amb les dues metodologies. Per tant, s'obté un model geofísic únic que permet una millor interpretació geològica final del subsòl.

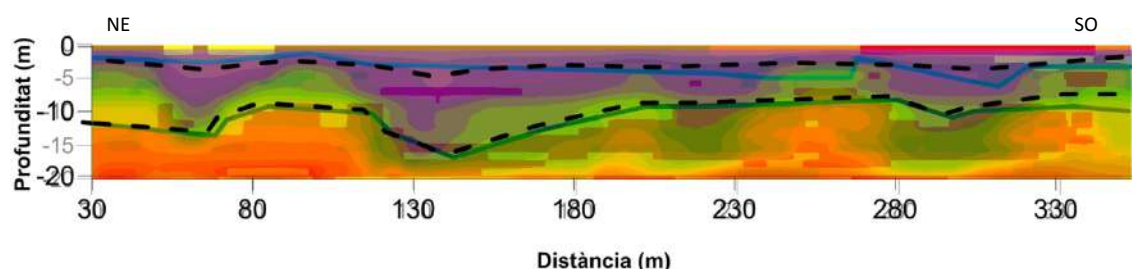


FIG. 6.12. Imatge que compara els dos models de velocitat sísmica del perfil de la Granadella que resulten de la inversió conjunta amb el programari SUBROUTINES.

Si comparem els resultats del model conjunt amb el model independent, veiem que en la sísmica de refracció es detecten en ambdós casos tres capes o litologies. La primera capa no presenta el mateix gruix, tot i que els seus valors de velocitat són bastant aproximats. En canvi, les següents capes si que presenten la mateixa geometria ja que la frontera es troba aproximadament als 12 m de fondària (figura 6.13).

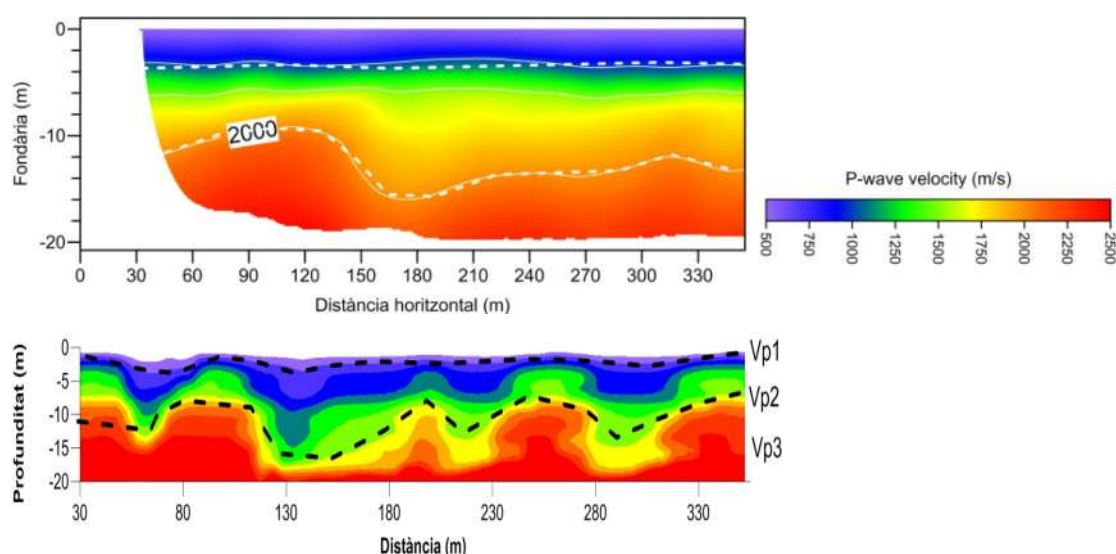


FIG. 6.13. Imatge que compara els dos models de velocitat sísmica del perfil de la Granadella que resulten de la inversió individual (a dalt) i de la inversió conjunta amb el programa SUBROUTINES (a baix). Els dos models estan a la mateixa escala de velocitat.

Pel que fa a la tomografia elèctrica, els models que es mostren són diferents entre ells. El nombre de capes no coincideix ja que la capa superficial que apareix en la inversió conjunta no es veu clara en el model individual. Malgrat això, els valors de la resistivitat elèctrica són coherents entre ells i la frontera situada a més fondària presenta similituds. Aquesta inversió està realitzada amb un pes igual pels dos tipus de dades (figura 6.14).

Aquest punt és crític en el procés de la inversió conjunta i està dirigit pels paràmetres “*damping factors*”. L'autor recomana fer molts assajos amb diferents pesos per a poder extreure el model òptim final. Segons l'estructura geològica de la zona pot ser que hi hagi un tipus de dada que vegi millor un tipus determinat d'estructura i, per tant, aquella dada hauria de tenir un pes més elevat en el procés de la inversió. El fet que cada inversió requereixi molt temps de computació ha fet inviable que es pugui aprofundir en aquest aspecte. Això seria un treball apart que s'hauria de fer en un futur. De moment, i per a aquest treball s'ha considerat adequat que les dades fossin invertides amb el mateix pes (*damping factors* iguals).

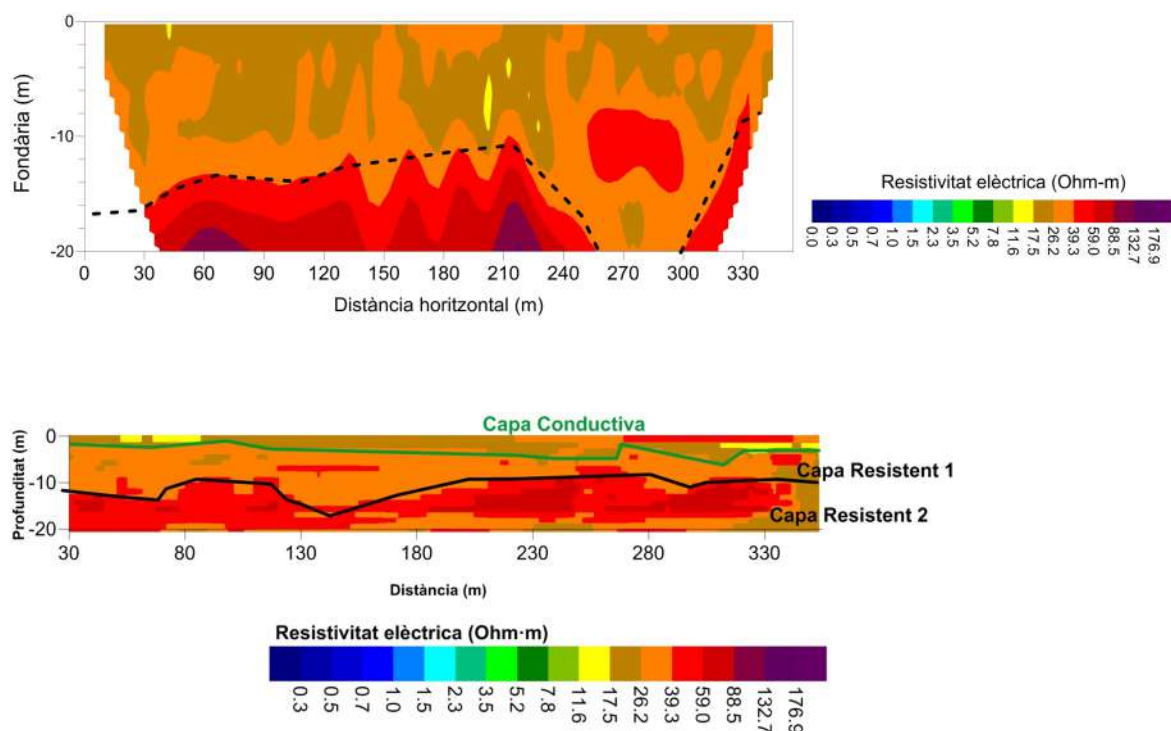


FIG. 6.14. Imatge que compara els dos models de resistivitat elèctrica del perfil de la Granadella que resulten de la inversió individual (a dalt) i de la inversió conjunta amb el programa SUBROUTINES (a baix).

Com a conclusió podem dir que aquesta inversió conjunta s'ajusta bastant al problema que es vol resoldre en aquest treball. Les fronteres entre els models sísmics i elèctrics tenen una molt bona correlació entre elles, no obstant la interpretació segons la geologia de la zona i la comparació amb els models individuals presenta encara certes discrepàncies.

Potser modificant els pesos de les dades aquestes discrepàncies podrien ser rectificades. Com ja s'ha dit, aquest aspecte es desenvoluparà en treballs futurs.

## 7. CONCLUSIONS

L'objectiu principal d'aquest treball era aconseguir una metodologia per invertir les dades conjuntes procedents de la tomografia elèctrica i de la sísmica de refracció. Els resultats obtinguts s'han assolit satisfactòriament després de realitzar nombroses proves i nombroses inversions amb cada programari, tant amb el *SEISRES* com amb el *SUBROUTINES*.

Si analitzem cada programari per separat podem extreure una sèrie de conclusions molt importants per a seguir treballant en aquesta línia, que es capta com un àmbit de futur dins de la geofísica.

Si analitzem el *SEISRES*, s'ha pogut veure que:

- És un programari molt senzill d'utilitzar però que alhora presenta moltes restriccions. És un programari tant senzill que, per exemple, no és pot tornar enrere si t'equivoques en marcar un punt del tir, i això molts cops ha fet endarrerir el meu treball.
- El programari, al ser de lliure accés, no inclou suficient informació sobre el seu funcionament i la metodologia que utilitza per a realitzar la inversió seqüencial. Per això, el desenvolupament del treball ha estat lent. Primer vaig haver d'entendre el format dels arxius de les dades d'entrada perquè a l'hora de ser cridades pel programari funcionés correctament. També vaig haver de realitzar nombroses proves amb els arxius d'exemple sintètics, aportats per l'autor, per arribar a comprendre quina era la metodologia en el marcatge dels punts del tir. Aquesta part del programari és bàsica per a obtenir el mateix model final. Finalment, es va poder aplicar el programari a les dades reals del Delta de l'Ebre i jugar amb el diferents paràmetres de la inversió per a que sortissin resultats coherents (nº d'iteracions elevat, 5000).
- La sortida de dades del programa és un altre inconvenient que aquest presenta. Quan es genera l'arxiu del model final de les dades sísmiques, aquest només pot obtenir-se de manera gràfica en 2D. La sortida del model sísmic en format d'arxiu és una mitja en velocitat i en gruix de les capes per a una expressió 1D del subsòl. Pel cas de l'arxiu de dades elèctriques aquest ha de ser modificat correctament, per a després poder ser obert amb el *Surfer*.

- Tot i les mancances trobades, el temps que inverteix el programa en resoldre el problema invers seqüencial és molt baix. Es pot dir que l'obtenció del model elèctric final és immediat després d'aplicar un nombre d'iteracions també elevat (5000).

El *SUBROUTINES*, és un programari més elaborat en el qual també s'han pogut veure els avantatges i inconvenients que presenta:

- El programari és molt més evolucionat però això el fa també més complex. Aquest es comporta com una 'caixa negra' difícil de modificar. Això ha implicat la realització de nombrosos test per obtenir un resultat coherent i verificar el seu correcte funcionament. Primer amb dades sintètiques proporcionades per l'autor, i després amb les dades reals del Delta de l'Ebre.
- L'avantatge d'aquest programari és que la introducció de les dades és molt senzilla, ja que s'obren les finestres d'entrada de dades i de paràmetres. Això ho fa molt esquemàtic i senzill.
- La dificultat d'aquest programa ha estat entendre quins són els paràmetres claus del mètode d'inversió: *damping* factor per a cada tipus de dada (es tradueix en donar un pes en el procés de la inversió) i les característiques del model sísmic inicial (el número de capes i l'espessor de cadascuna d'elles).
- Un problema greu del programa per a la inversió conjunta ha estat el temps de computació. Malgrat reduir el nombre de dades de la pseudosecció m'havia d'esperar un dia, inclús a vegades dos dies per a que acabés la inversió i dónes l'arxiu dels models finals.
- En aquest cas, en comparació amb el *SEISRES*, els arxius no s'havien de modificar en cap cas i es podien obrir directament amb el *Surfer*.

Per tant, cada programa presenta els seus avantatges i inconvenients de manera que els dos són vàlids. La selecció d'un o l'altra estarà en funció dels nostres objectius.

El programari *SEISRES* és molt aparatós i alhora requereix molta feina abans de poder realitzar la inversió seqüencial. Ara bé, el temps de computació posterior és reduït i la inversió s'obté de manera molt ràpida.

En el programari *SUBROUTINES* l'entrada de dades és molt fàcil però requereix d'un apropiat coneixement de paràmetres que intervenen en el procés de la inversió, i el temps que utilitza per a la inversió conjunta és extremadament gran.

Per a concloure aquest treball, crec que en general la inversió conjunta ha donat millors resultats que la inversió seqüencial. Malgrat això, en alguns casos aquesta darrera pot ser molt eficient d'aplicar.

El model òptim trobat amb la inversió conjunta és un model de tres capes ben diferenciades amb uns valors de resistivitat elèctrica i  $V_p$  coherents, encara que existeixi certa discrepància en el gruix de les capes. En primer lloc, s'ha trobat un nivell amb valors de resistivitat elèctrica i  $V_p$  baixos els quals corresponen a una capa de sediments lacustres de l'Holocè que poden ser interpretats com una alternança d'argiles i llims. En segon lloc, s'ha trobat una capa compactada que presenta un augment en els valors de resistivitat elèctrica i  $V_p$  i que correspon a una capa de sorres i graves intercalada que pot incloure localment sediments fins lacustres del Plistocè superior. Finalment, hi ha una capa resistiva amb valors de  $V_p$  alts que s'associa a la presència de la capa de graves.

Del desenvolupament d'aquest treball es pot concloure que les eines (programaris) utilitzades són efectives però només en certs casos, en aquells contextos geològics poc complexos com podria ser el cas de les estructures estratificades. Malgrat els bons resultats encara falta molt de treball i molta informació per poder millorar la inversió conjunta avui dia, però es veu clar que les investigacions futures han d'anar orientades en aquesta línia.

Els programaris plantejats en el treball han estat modificats per tal que funcionessin en les màquines de l'ICGC, i han estat testejats amb dades sintètiques i també amb dades reals per tal d'entendre la seva metodologia de càlcul. Així, en aquest moment s'han deixat preparats com a eines molt útils i efectives per a la Unitat de Tècniques Geofísiques de l'ICGC. Els tècnics podran utilitzar-les de la manera que més convingui per a millorar la integració de les dades geofísiques i correlacionar-les amb la geologia de manera que el resultat sigui el model més realista possible. Un model que ha de satisfer les dades geofísiques i el coneixement geològic del subsòl al mateix temps.

## 8. REFERÈNCIES

- Albouy, Y., Andrieux, P., Rakotonondrasoa, G., Ritz, M., Descloitres, M., Join, J.L., Rasolomanana, E., (2001). *Mapping coastal aquifers by joint inversion of DC and TEM soundings—three case histories*. Groundwater 39, 87–97.
- Allen, P.A. & Allen, J.R., (2005). *Basin Analysis; Principles and Applications*. Blackwell Publishing Ltd., Malden-Oxford-Victoria, 549.
- Athanasiou, E.A., Tsourlos, P.I., Papazachos, C.B., Tsokas, G.N., (2007). *Combined weighted inversion of electrical resistivity data arising from different array types*. J. Appl. Geophys. Vol. 62, 124–140.
- Atkin, R. J. & Fox, N., (1980). *An Introduction to the Theory of Elasticity*. Ed. Dover, Londres.
- Balia, R., Gavaudo, E., Ardaù, F., Ghiglieri, G., (2003). *Geophysical approach to the environmental study of a coastal plain*. Geophysics Vol.68, 1446–1459.
- Berge, P.A., Berryman, J.G., Bertete-Aguirre, H., Bonner, P., Roberts, J., Wildenschild, D., (2000). *Joint inversion of geophysical data for site characterization and restoration monitoring*. LLNL report number .URCL-ID- 128343. Proj. 55411.
- Caldés, C., (2006). *Aplicació de mètodes geofísics a l'estudi de col·lapses i subsidència*. Treball Final de Carrera, Universitat de Barcelona.
- Dahlin, T. & Zhou, Z., (2004). *A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays*. Vol. 52, num. 5, 359-477.
- Demirci, I., Candansayar, M.E., Soupios, P. & Vafidis, A., (2016). *Joint Inversion of Direct Current Resistivity, Radio-Magnetotelluric and Seismic Refraction Data: its implementation on hydrogeological problems*. Conference Paper: 23rd Electromagnetic Induction Workshop, At Chiang Mai, Thailand, Volume: Abstract Book.
- Dey, A., Morrison, H.F., (1979). *Resistivity modeling for arbitrary shaped three-dimensional shaped structures*. Geophysics, Vol. 44, 753780.



- Dobrin, M., Savit, C., (1988). *Introduction to Geophysical Prospecting*. McGraw-Hill Book Company, 206-207, 258, 239.
- Estrada, L.A., (2008). *Prospección sísmica para Geólogos*. Apuntes Geofísica– FACET – UNT, Universidad Nacional de Tucuman, 2-14.
- Fregoso, E., Gallardo, L.A., (2006). *Inversión conjunta 3D con restricciones de gradientes cruzados usando datos gravimétricos y magnéticos*. Geos., Vol. 26, No. 1, EG-17, 20.
- Gabàs, A., (2003). *Nous aspectes metodològics en l'exploració elèctrica i electromagnètica*. Tesi Doctoral, Universitat de Barcelona.
- Gallardo, L.A. & Yulen, A., (2016). *AEM Cross-Gradient Constrained Inversion of Gravity and Magnetic Data*. Conference Paper: ASEG-PESA-AIG 2016, doi: 10.1071/ASEG2016ab178.
- Gallardo, L.A. & Meju, M.A., (2007). *Joint two-dimensional cross-gradient imaging of magnetotelluric and seismic traveltime data for structural and lithological classification*. Geophys. J. Int. 169, 1261–1272, doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03366.x.
- Gallardo, L.A. & Meju, M.A., (2004). *Joint two-dimensional DC resistivity and seismic travel time inversion with cross-gradients constraints*. Journal of Geophysical Research, Vol.109, B03311, doi: 10.1029/2003JB002716.
- Gallardo, L.A., (2007). *Multiple cross.gradient joint inversion for geospectral imaging*. Geophysical Research Letters, Vol.34, L19301, doi: 10.1029/2007GL030409.
- Gallardo, L.A., Fontes, S.L., Meju, M.A., Buonora, M.P. & Lugao, P.P., (2012). *Robust geophysical integration through structure-coupled joint inversion and multispectral fusion of seismic reflection, magnetotelluric, magnetic and gravity images: Example from Santos Basin, offshore Brazil*. Geophysics, Vol. 77, No. 5, doi: 10.1190/geo2011-0394.1.
- Galloway, D., Jones, D.R. & Ingebritsen, S.E., (1999). *Land Subsidence i the United States*. USGS Circular, 1182.
- García, M.A., (2007). *Inversión conjunta de datos eléctricos de corriente continua y radiomagnetotelúricos bajo un esquema TSCV*. Proyecto de Grado, Univerdidad Simón Bolívar.
- Gayà, M.A., (2004). *Procesado de Sísmica de Reflexión Superficial en el Complejo Turbidítico de Ainsa (Huesca)*.
- Gebrande, H., (1986). *CMP-Refraction seismic. "Seismik auf neuen Wegen"*, 191-205.

Griem, W. & Griem-Klee, S., (1999-2005). *Apuntes Geología General*.

Hamdan, A.H. & Vafidis, A., (2012). *Joint inversion of 2D resistivity and seismic travel time data to image saltwater intrusion over karstic areas*. Environ Earth Sci, doi: 10.1007/s12665-012-1875-9.

Hering, A., Misiek, R., Gyulai, A., Ormos, T., Dobroka, M., Dersen, L., (1995). *A joint inversion algorithm to process geoelectrical and surface wave seismic data*. Geophys Prospect 43, 135-156.

Holzer, T.L., (1984). *Ground failure by ground-water withdrawal from unconsolidated sediment*. Geological Society of America Reviews in Engineering Geology VI, 67-105.

ICGC (2016). *Aplicación de técnicas eléctricas y sísmicas para la caracterización de los sedimentos en el Delta del Ebro*. (Proyecto Ebro- Admiclim-LIFE). GA-0009/15.

IGC (2012). *Estudi geofísic a Camarasa com a suport al mapa geològic 1:25000*. Informe: GA-004/12.

Jouet, G., Hutton, E.W.H, Syvitski, J.P.M., Berné, S., (2008). *Response of the Rhône deltaic margin to loading and subsidence during the last climatic cycle*. Computers and Geosciences, Vol. 34, 1338-1357.

Lecomte, I., Gjoystdal, H., Dahle, A. & Pedersen, O. C., (2000). *Inprovig modelling and inversion in refraction seismic with a first-order Eikonal solver*. Geophysical Prospecting, Vol. 48; 437-454.

Linde, N. & Doetsch, J., (2016). *Joint inversion in hydrogeophysics and near-surface geophysics*. Book: Integrated imaging of the Earth: Theory and Applications, Chapter 7, 119-135, John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey. doi: 10.1002/9781118929063.ch7.

Lines, L.R., Schultz, A.K. & Treitel, S., (1988). *Cooperative inversion of geophysical data*. Geophysics, Vol. 53, No. 1. doi: 10.1190/1.1442403.

Maldonado, A., (1972). *El delta del Ebro. Estudio sedimentológico y estratigráfico*. Bol. Estratigrafia, 486.

Moser, T.J., (1991). *Shortest path calculation of seismic rays*. Geophysics, Vol. 56, 59–67.

- Murray, W.H., &Pappas, C.H., ( 1995). *The Visual C++ Handbook*. McGraw-Hill, New York, 1096.
- Nath, S.K., Shahid, S. & Dewangan, P., (1999). *SEISRES – a Visual C++ program for the sequential inversion of seismic refraction and geoelectric data*. Computers & Geosciences 26, 177-200.
- Ogilvy, R.D., Kuras, O., Meldrum, P.I., Wilkinson, P.B., Chambers, J.E., Sen, M., Tsourlos, P., (2009). *Monitoring saline intrusion of a coastal aquifer with automated electrical resistivity tomography*. In: Proceedings, 15th Annual Meeting EAGE-Near-Surface Geophysics Conference, Dublin, Ireland.
- Orellana, E., (1982). *Prospección geoeléctrica en corriente continua*. 2ª Edición Paraninfo, 577.
- Peralta, A., (2007). *Levantamiento sísmico de refracción somera y levantamiento geológico en el área de El Mamón, al Norte del poblado de Urumaco, Estado Falcón*. Proyecto de grado. Universidad Simón Bolívar.
- Puig, R., (2016). *Integració de dades geofísiques per a la caracterització del subsòl en una zona afectada per inestabilitats del terreny*. Treball Final de Grau, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Revil A., (2012). *Spectral induced polarization of shaly sands: Influence of the electrical double Layer*. Water Resources Research 48.
- Richter, C. F., (1958). *Elementary seismology*. San Francisco. 241.
- Serra, L., (2008). *Tomografia sísmica de refracció i tomografia elèctrica: processat interpretació conjunta*. Treball Final de Carrera, Universitat de Barcelona.
- Schmutz, M., Albouy, Y., Guerin, R., Maquaire, O., Vassal, J., Schott, J.J., Descloitres, M., (2000). *Joint electrical and time domain electromagnetism (TDEM) data inversion applied to the Super Sauze earthflow (France)*. Surveys Geophys, Vol. 21, 371–390.
- Schuster, G.T. Quintus-Bosz, A., (1993). *Wavepath eikonal travelttime inversion*. Theory. Geophysics; Vol. 58, 1314–1323.
- Souplos, M.P., Papazaxoz, C.P., Johlin, C., Tsokas, G.N., (2001). *Nonlinear three-dimensional travelttime inversion of crosshole data with an application in the area of Middle Urals*. Geophysics, Vol. 66, 627–636.

Tillman, A. & Stocker, T., (2000). *A new approach for the joint inversion of seismic and geoelectric data*. Presented at 63th EAGE Conference and Technical Exhibition, European Association of Geoscience and Engineering, Amsterdam.

Tsourlos, P.I., Szymanski, J.E., Tsokas, G.N., (1998). *A smoothness constrained algorithm for the fast 2-D inversion of DC resistivity and induced polarization data*. J. Balkan Geophys Soc. Vol.1, 3–13.

Wisén, R. & Christiansen, A.V., (2005). *Laterally and Mutually Constrained Inversion of Surface Wave Seismic Data and Resistivity Data*. JEEG, Vol. 10, 251-262.

Zhou, J.J., Zhang, X.D. & Xiu, C.X., (2015). *A MATLAB-Based Numerical and GUI Implementation of Cross-Gradients Joint Inversion of Gravity and Magnetic Data*. Journal of Software Engineering and Applications, 8, 93-101.

#### **ADRECES WEB CONSULTADES:**

<<https://institutogeofisicauecyd.wordpress.com/2013/11/27/inversion-conjunta-de-multiples-datos-geofisicos-para-la-caracterizacion-del-subsuelo/>>

(Consultada al Gener del 2017)

<<http://pendientedemigracion.ucm.es/info/geodina/docencia/geofisica/SISMICApRACTICAS.pdf>>

(Consultada al Març del 2017)

<[http://www.unsa.edu.ar/geofisica-salta/?page\\_id=195](http://www.unsa.edu.ar/geofisica-salta/?page_id=195)>

(Consultada al Març del 2017)

<<http://www.osso.org.co/docu/tesis/2001/comportamiento/refraccion.pdf>>

(Consultada al Març del 2017)

<<https://catedras.facet.unt.edu.ar/geofisica/wp-content/uploads/sites/4/2014/02/Sismica-para-Geologos.pdf>>

(Consultada al Març del 2017)

<[http://mediambient.gencat.cat/web/.content/home/ambits\\_dactuacio/patrimoni\\_natural/sistemes\\_dinformacio/inventari\\_despais\\_dinteres\\_geologic/consulta\\_de\\_les\\_fitxes\\_descriptives\\_dels\\_eig/documentos/320\\_descrip.pdf](http://mediambient.gencat.cat/web/.content/home/ambits_dactuacio/patrimoni_natural/sistemes_dinformacio/inventari_despais_dinteres_geologic/consulta_de_les_fitxes_descriptives_dels_eig/documentos/320_descrip.pdf)>

(Consultada a l'Abril del 2017)